

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESTABILIDAD LATERAL BASADO EN  
LA LÓGICA BORROSA EN CARSIM**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

Autor: ÁLVARO LABORDA YEBRA

Tutoras: RANA FARAG

BEATRIZ LÓPEZ BOADA

# RESUMEN DEL PROYECTO

En este trabajo se pone a prueba un modelo de controlador de estabilidad basado en la lógica difusa que utilizará la dirección y el distribuidor de fuerzas de frenada de las ruedas delanteras para mejorar el control del vehículo. Este controlador ha sido desarrollado con los programas *Simulink* y *Matlab* y puesto a prueba con un modelo matemático de 9 grados de libertad. En este proyecto se combina el modelo de control desarrollado anteriormente con un modelo matemático más completo de 15 grados de libertad desarrollado por el programa *CarSim*. Para llevar a cabo esta evaluación se ha de conocer el funcionamiento del modelo de control, la utilización del simulador *CarSim* y poder combinar ambos programas para obtener los resultados. Además se intentará crear un nuevo controlador de estabilidad más eficaz que el inicial.

Para verificar el comportamiento de ambos controladores se realizan múltiples pruebas recreando situaciones críticas reales. Las pruebas con las que se dictará la eficacia del sistema de control serán en un doble cambio de línea, en curvas y un *J-turn*.

Se finalizará este proyecto realizando las oportunas recomendaciones en cuanto a las medidas a llevar a cabo para mejorar el sistema de control de estabilidad.

## PALABRAS CLAVE

Seguridad activa de vehículos, Viabilidad y Efectividad del control de estabilidad, control de la dirección, lógica difusa y control lateral del vehículo.

# AGRADECIMIENTOS

Llegado este momento tan ansiado, con el que tantas veces he soñado y que parecía imposible que llegara, solo me queda agradecer:

A mi familia al completo, gracias por todo el apoyo recibido de vuestra parte y por todo el interés mostrado. En especial dar las gracias a mis padres y hermana, por haberme educado con una moral y unos principios verdaderamente admirables. Por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera y por haberse preocupado tanto o más que yo por mis preocupaciones.

A Rana, mi tutora y amiga, gracias por todo tu esfuerzo y tiempo dedicados a mi formación a lo largo de este proyecto. Es un consuelo saber que todavía quedan personas y profesores así... Mil gracias.

A mi compañera Victoria de la universidad que si no llega a ser por ella no me entero de la fecha de ninguna de las prácticas.

A todos los miembros de mi grupo de estudio que me ayudaron a no dar ningún examen por perdido.

A Idoia gracias por apoyarme siempre, tanto en los momentos buenos como en los malos, y comprender mi estado anímico en épocas de examen. Gracias por darme todo tu amor en estos últimos años y por quererme tanto.

Gracias a todos vosotros por el apoyo y la implicación realizada durante toda mi época de formación.

A todos vosotros, de todo corazón, muchas gracias...

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.2. MOTIVACIÓN .....	3
1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	4
 <b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	 <b>1</b>
 <b>3. MODELO DE VEHÍCULO.....</b>	 <b>5</b>
3.1. MODELO DE VEHÍCULO INICIAL .....	5
3.1.1. MODELO MATEMÁTICO .....	5
3.1.1.1. MODELO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD .....	6
3.1.1.2. VELOCIDAD DE GUIÑADA .....	7
3.1.1.3. VELOCIDAD ANGULAR DE CADA RUEDA.....	8
3.1.1.4. FUERZAS VERTICALES .....	9
3.1.1.5. MODELO DE NEUMÁTICO.....	9
3.2. INTRODUCCIÓN DE <i>CARSIM</i> .....	10
3.2.1. MODELO DE VEHÍCULO DE <i>CARSIM</i> .....	10
3.3. MODELO DE UN CONTROLADOR DE ESTABILIDAD .....	11
3.3.1. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO .....	11
3.3.1.1. VALORES DE REFERENCIA .....	13
3.3.1.2. MODELO DE 3 GDL .....	13
3.3.1.3. CONTROLADOR CON LÓGICA <i>FUZZY</i> Y DISTRIBUIR DE FUERZAS DE FRENADO .....	14
3.3.1.4. MODELO COMPLETO DE VEHÍCULO <i>CARSIM</i> .....	14
 <b>4. LÓGICA BORROSA.....</b>	 <b>15</b>
4.1. LÓGICA BORROSA .....	15
4.2. CONJUNTOS DIFUSOS.....	16

4.3.	OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS.....	18
<b>5.</b>	<b>CONTROLADORES CON LÓGICA BORROSA .....</b>	<b>22</b>
5.1.	ESTRUCTURA DE LOS CONTROLADORES DE ESTABILIDAD .....	23
5.2.	FUNCIONES DE PERTENENCIA DE VARIABLES.....	26
5.2.1.	CONTROLADOR INICIAL.....	27
5.2.2.	CONTROLADOR DE ESTABILIDAD PROPUESTO.....	31
<b>6.</b>	<b>CONEXIÓN DE <i>CARSIM</i> CON EL MODELO <i>FUZZY</i>.....</b>	<b>35</b>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
7.1.	CASOS DE ESTUDIO .....	46
7.1.1.	DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 108 KM/H EN ASFALTO SECO .....	48
7.1.2.	DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 72 KM/H EN ASFALTO CON HIELO.....	55
7.1.3.	CURVA DE RADIO 200M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO SECO.....	59
7.1.4.	CURVA DE RADIO 500M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO CON HIELO .....	65
7.1.5.	CÍRCULO DE RADIO 152 M A 120 KM/H EN ASFALTO SECO.....	68
7.2.	DIFERENCIAS ENTRE LOS CONTROLADORES DE ESTABILIDAD .....	74
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
8.1.	CONCLUSIONES .....	76
8.2.	TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES .....	77
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>79</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Nomenclatura utilizada en el esquema del funcionamiento del modelo .....	13
Tabla 5.1: Nomenclatura utilizada en el controlador de lógica borrosa .....	24
Tabla 5.2: Entradas y salidas del controlador fuzzy .....	25
Tabla 5.3: Reglas del controlador de lógica borrosa inicial .....	31
Tabla 5.4: Reglas del controlador de lógica borrosa propuesto en seco .....	33
Tabla 5.5: Reglas del controlador de lógica borrosa propuesto en hielo .....	34
Tabla 7.1: casos de estudio.....	47
Tabla 8.1: pruebas realizadas .....	77

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 7.1: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b) .....	50
Gráfica 7.2: Trayectoria seguida por los vehículos para volver al carril .....	51
Gráfica 7.3: Trayectoria seguida por los vehículos para volver a su posición inicial....	52
Gráfica 7.4: Representación de la variable de velocidad de guiñada .....	53
Gráfica 7.5: Comportamiento del valor del ángulo de deriva .....	54
Gráfica 7.6: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b) .....	56
Gráfica 7.7: Representación de la variable de velocidad de guiñada .....	57
Gráfica 7.8: Comportamiento del valor del ángulo de deriva .....	58
Gráfica 7.9: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b) .....	61
Gráfica 7.10: desplazamiento lateral que sufren los vehículos.....	62
Gráfica 7.11: Representación de la variable de velocidad de guiñada .....	63
Gráfica 7.12: Comportamiento del valor del ángulo de deriva .....	64
Gráfica 7.13: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b) .....	66
Gráfica 7.14: Representación de la variable de velocidad de guiñada .....	67
Gráfica 7.15: Comportamiento del valor del ángulo de deriva .....	68
Gráfica 7.16: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b) .....	70
Gráfica 7.17: desplazamiento lateral que sufren los vehículos.....	71
Gráfica 7.14: Representación de la variable de velocidad de guiñada .....	72

Gráfica 7.15: Comportamiento del valor del ángulo de deriva .....	73
-------------------------------------------------------------------	----



# ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 7.1: Representación visual del caso 1.....	48
Imagen 7.2: desplazamiento lateral a la hora de recuperar la posición inicial.....	53
Imagen 7.3: Representación visual del caso 2.....	55
Imagen 7.4: Representación visual del caso 3.....	59
Imagen 7.5: Representación visual del caso 4.....	65
Imagen 7.6: Representación visual del caso 5.....	69
Imagen 7.7: momento de mayor diferencia entre ambos controladores, 1.71 segundos .....	72

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema del funcionamiento del modelo matemático .....	5
Figura 2.1: actuación del controlador en caso de sobreviraje .....	3
Figura 2.2: actuación del controlador en caso de subviraje.....	3
Figura 4.1: transición entre alto o bajo con la lógica borrosa.....	17
Figura 4.2: transición entre alto o bajo con la lógica booleana .....	18
Figura 4.3: Conjunto difuso entre 4 y 7 .....	19
Figura 4.4: Número difuso en torno a 3 .....	19
Figura 4.5: Operación AND del conjunto difuso.....	20
Figura 4.6: Operación OR del conjunto difuso .....	20
Figura 4.7: Negación del conjunto difuso A.....	21
Figura 5.1: Esquema de funcionamiento del controlador con lógica fuzzy .....	23
Figura 5.2: Variable de entrada al controlador inicial $\beta - \beta_d$ .....	27
Figura 5.3: Variable de entrada al controlador inicial $W - W_d$ .....	28
Figura 5.4: Variable de salida del controlador inicial $M_z$ .....	28
Figura 5.5: Variable de salida del controlador inicial $\delta_a$ .....	29
Figura 5.6: Variable de entrada al controlador propuesto $\beta - \beta_d$ .....	31
Figura 5.7: Variable de entrada al controlador propuesto $W - W_d$ .....	32
Figura 5.8: Variable de salida del controlador propuesto $M_z$ .....	32
Figura 5.9: Variable de salida del controlador propuesto $\delta_a$ .....	32
Figura 6.1: Esquema de funcionamiento del modelo matemático.....	36
Figura 6.2: Ventana del modelo matemático.....	36

Figura 6.3: Lista de modelos matemáticos.....	37
Figura 6.4: Ventana del modelo matemático de Simulink .....	37
Figura 6.5 Elección del modelo matemático escogido .....	38
Figura 6.6: Pantalla desde la cual se definen los datos del modelo matemático .....	38
Figura 6.7: Ventana de elección de variables de entrada al simulador .....	39
Figura 6.8: Ventana de elección de variables de salida del simulador.....	40
Figura 6.9: Esquema del modelo matemático introducido en el programa CarSim .....	41
Figura 6.10: Lugar en el que se indican los nuevos valores que se envían al vehículo ..	42
Figura 6.11: Cálculos realizados por el sistema de lógica difusa .....	43
Figura 6.12: Modelo de 3GDL.....	44



# 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las empresas del mundo del automóvil han invertido una parte importante de su tiempo y dinero en la creación de nuevos sistemas de seguridad para los vehículos. El avance más importante de los últimos años ha sido el sistema de control de estabilidad, ESP. Esto se debe a que la mayoría de los accidentes, tanto en carretera como en ciudad, se deben a pérdidas de control del vehículo [1]. Con el sistema de controlador de estabilidad se intenta mantener el control sobre el vehículo en situaciones críticas como por ejemplo curvas rápidas o volantazos inesperados. El sistema a través de sensores detecta si el vehículo sigue el ángulo indicado por el conductor y en el caso de que no sea el mismo actúa sobre la dirección y el par de frenado para corregir dicho error.

En la actualidad, La utilización de simulaciones para el desarrollo de un sistema exitoso está a la orden del día. Esto se debe a que con estas pruebas se reducen en gran medida el tiempo de diseño del sistema, el coste de experimentar y se disminuyen los riesgos de error al manejar un sistema real.

Un gran número de empresas que se dedican al mundo del automóvil emplean el programa de simulación *CarSim* para estudiar el comportamiento dinámico del vehículo en distintas situaciones. El realismo de este programa y su alto grado de eficacia permite obtener mucha información verídica con la que poder trabajar. Otra ventaja que presenta este programa proviene que se puede combinar con otros programas como por ejemplo *Simulink*.

## 1.1. OBJETIVOS

En este proyecto se intentará alcanzar dos objetivos principales que son, poner a prueba la eficacia de un controlador de estabilidad, desarrollado mediante de la lógica difusa, y crear un controlador de estabilidad que sea más eficaz en situaciones críticas utilizando también la lógica difusa. El controlador inicial ha sido desarrollado y verificado con los programas *Simulink* y *Matlab*, con un modelo matemático de un coche de 9 grados de libertad. Para lograr estos objetivos en primer lugar se deberá de aprender a manejar el programa de simulación *CarSim* y en segundo lugar se deberá de combinar ambos programas para poder demostrar la eficacia del sistema y crear uno más eficaz.

En el trabajo propuesto, se combina el modelo de control desarrollado anteriormente con un modelo matemático más completo de 15 grados de libertad desarrollado por el programa *CarSim* [2]. Que aporta no solo un modelo verificado que es utilizado por muchos fabricantes de vehículos, sino que además propone herramientas más avanzadas para visualizar y calificar los resultados obtenidos en los ensayos [3].

Un gran número de empresas que se dedican al mundo del automóvil emplean el programa de simulación *CarSim* para estudiar el comportamiento dinámico del vehículo en distintas situaciones. Este programa permite variar algunas de las características tanto del vehículo como las condiciones de su entorno para después mostrar una simulación del comportamiento dinámico del coche en esa situación. El realismo de este programa y su alto grado de eficacia permite obtener mucha información verídica con la que poder trabajar [4].

Los controles de estabilidad se basan en un modelo matemático que en función de la información que recibe del exterior mediante sensores o diferentes métodos otorga una respuesta concreta. El modelo matemático se puede conectar mediante el programa *Simulink* que es una de las herramientas del programa *Matlab* y controlar a través de las entradas que se indiquen con el programa *CarSim* [4].

En este proyecto se combinarán estos dos programas de ordenador con la finalidad de poner a prueba un control de estabilidad desarrollado mediante la lógica difusa e intentar encontrar uno mejor. Para verificar su comportamiento se realizan múltiples pruebas recreando situaciones críticas reales, como por ejemplo tener que evitar un vehículo parado en medio de la calzada tanto con el asfalto seco, mojado o con hielo y variando la velocidad a la que ocurre.

## 1.2. MOTIVACIÓN

En la actualidad ha habido un aumento, por parte de la sociedad, de la preocupación por la seguridad vial. Un gran número de estudios demuestran que un número considerable de los accidentes, tanto en ciudad como en carretera, se deben a la pérdida de control del vehículo [1]. Una manera de reducir este tipo de accidentes sería a través del uso de un sistema de control de estabilidad. Los sistemas de control que habitualmente se instalan por las empresas automovilísticas no son perfectos y hay estudios que intentan crear un sistema de control más eficaz. Uno de ellos lo intentó crear mediante la lógica difusa y se puso a prueba sobre un modelo matemático de 9 GDL que representaba a un vehículo de tipo turismo. Los resultados que se obtuvieron fueron favorables y optimistas [5]. No obstante al emplear un modelo matemático tan simple para representar al vehículo sus resultados no se acercan a la realidad. De ahí que en este proyecto fin de carrera se quiera poner a prueba el sistema de control de estabilidad que se creó mediante el uso de un programa de simulación denominado *CarSim*, que aporta un modelo matemático más complejo. El control de estabilidad se pondrá a prueba utilizando un modelo

matemático más completo y por lo tanto se obtendrán resultados que se aproximarán más a la realidad.

Para este estudio se utilizará el programa de simulación *CarSim* ya que aportará un modelo matemático que representa el comportamiento mecánico del vehículo de 15 GDL, tiene en cuenta cómo afectará el motor al comportamiento, utilizará 110 ecuaciones diferenciales ordinarias para conocer la dinámica de los componentes como pueden ser la temperatura del líquido de frenos y el combustible y por ultimo tiene cerca de 200 variables que definirán el estado del sistema [2]. Además propone herramientas más avanzadas para visualizar y calificar los resultados obtenidos en los ensayos [4].

### **1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

El resto del proyecto consta de los cinco siguientes capítulos:

#### *Capítulo II: ESTADO DEL ARTE*

El segundo capítulo ofrece una descripción del sistema de control de estabilidad (*Electronic Stability Program-ESP*) en los vehículos. Se explica su funcionalidad y eficacia frente a situaciones críticas.

#### *Capítulo III: MODELO DE VEHÍCULO*

En este tercer capítulo se expone el modelo matemático del controlador de estabilidad realizado con anterioridad por la universidad. Porque se utiliza el programa de simulación *CarSim* y las ventajas que ofrece.

#### *Capítulo IV: LÓGICA BORROSA*



Este capítulo se centra en explicar cómo funciona la lógica difusa y sus aplicaciones en la vida real.

### Capítulo V: CONTROLADORES DE LÓGICA BORROSA

En este capítulo se definirán los detalles del funcionamiento del sistema de control de lógica *fuzzy* tanto del controlador de estabilidad anterior como del propuesto en este proyecto.

### Capítulo VI: CONEXIÓN DEL CARSIM CON EL MODELO FUZZY

Este capítulo se centra en la combinación de ambos programas, es decir, *CarSim* y *Simulink*, para crear el esquema del modelo matemático, ver figura 1.1.

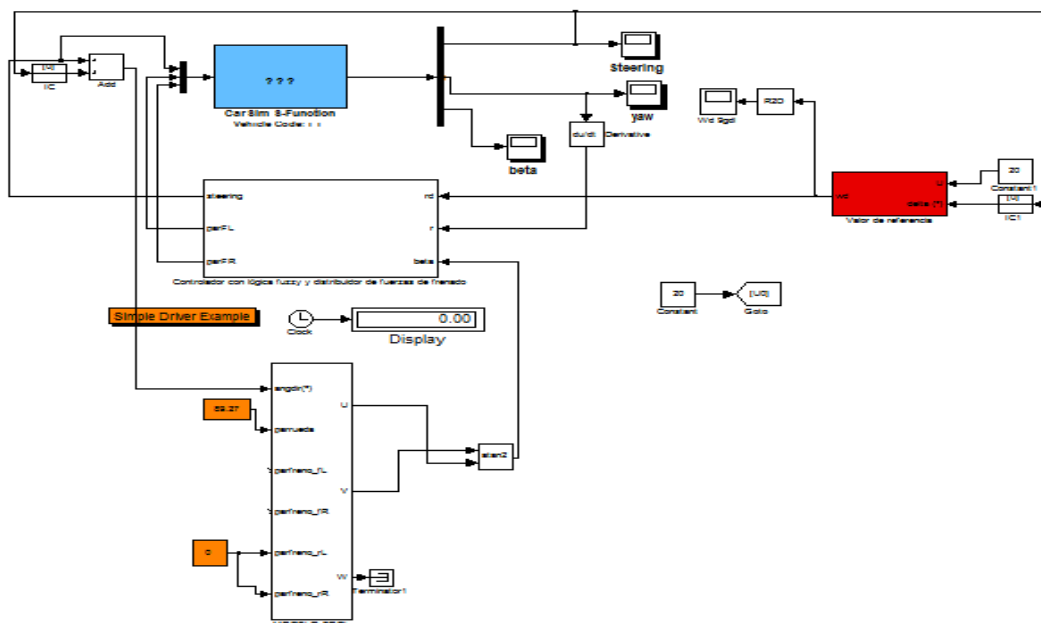


Figura 1.1: Esquema del funcionamiento del modelo matemático

### Capítulo VII: RESULTADOS

En el séptimo capítulo en primer lugar se exponen los resultados obtenidos para las situaciones seleccionadas y en segundo lugar se comentan los datos. Las pruebas con las que se dictará la eficacia del sistema de control serán en un doble cambio de línea y en curvas. En cada caso cambiará la velocidad del vehículo y el coeficiente de

rozamiento del asfalto imitando el efecto de una placa de hielo. En el caso de las curvas también se variará el radio de curvatura y el ángulo de giro.

### *Capítulo VIII: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS*

Para concluir se dedica este capítulo para hablar sobre la eficacia alcanzada por parte del proyecto y posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar a raíz de este estudio y con los cuales se podría conseguir mejorar el control de estabilidad.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En las últimas décadas las empresas del mundo del automóvil han invertido una parte importante de su tiempo y dinero en la creación de nuevos sistemas de seguridad para los vehículos. Si se tiene en cuenta que un gran porcentaje de los accidentes, tanto en ciudad como en carretera, se deben a pérdidas de control del vehículo el avance más significativo ha sido el sistema de control de estabilidad, ESP. Desde hace años existen varios estudios de distintos países que demuestran científicamente la efectividad y lo favorables que son los sistemas de control de estabilidad [1]. La implantación de estos dispositivos en los vehículos del tipo turismo y sobre todo en los todoterrenos disminuiría con creces el porcentaje de accidentes graves, relacionados con la pérdida de control sobre el vehículo, aproximadamente en un 50 por ciento. Por otra parte se podría reducir un 35% el número de accidentes en los que solamente se vería implicado un vehículo, por ejemplo salidas de vía, y un 30% el número de accidentes por colisión frontal con otros vehículos. A pesar de lo beneficioso que sería para la seguridad vial el empleo de este dispositivo en todos los vehículos la media Europea es tan solo del 42% y en España es de un 49% en el año 2006 [1]. La UE obligará a instalar este sistema en todos los vehículos nuevos a partir del 1 de noviembre del 2011 y para matriculaciones nuevas a partir del 1 de noviembre del 2014. Estudios realizados en los EE.UU. han dado como resultado que pueden salvarse solamente allí de esta manera más de 10.000 vidas al año.

Hoy en día, son dos los tipos de seguridad que funcionan en los vehículos con el fin de proteger la vida del conductor y acompañantes, la activa y la pasiva. La seguridad activa es aquella que intenta disminuir la probabilidad de accidente y la pasiva pretende minimizar los daños sobre los pasajeros en caso de que el accidente se produzca. Actualmente en el caso de los sistemas activos el control de estabilidad (ESP) es el más importante y el que puede aportar mejores resultados. El ESP

(*Electronic Stability Programme* o programa electrónico de estabilidad) es un dispositivo de funcionamiento electrónico que reduce la probabilidad de derrapaje o pérdida de control. El nombre que recibe este sistema depende del fabricante que lo cree, para Renault se denomina ESC pero otros nombres son, VDC (control dinámico del vehículo) o DSC (control dinámico de estabilidad). El sistema decide influir en función de los valores obtenidos por varios sensores colocados en el propio vehículo. Estos sensores informan a un sistema de decisión, el cual pone en marcha una serie de actuaciones sobre la dirección, frenos o suspensiones, con el objetivo de devolver a la normalidad el comportamiento del vehículo. Este sistema de decisión registra señales de: sensores de régimen que indican la velocidad de cada rueda, sensor goniométrico de dirección sensor de aceleración transversal informa a la unidad de control acerca del derrapaje lateral y sensor de la magnitud de viraje que informa sobre la tendencia al derrapaje de la parte trasera del vehículo. Con la información de los sensores citados determinará la trayectoria que el conductor quiere realizar y compara las mediciones con los parámetros guardados; si la aceleración transversal y el momento de derrape difieren en gran medida de los valores guardados, el vehículo tendría un comportamiento inestable y el sistema ESP entrara en funcionamiento. El ESP decide qué rueda debe ser frenada o acelerada intensamente, si es necesario reducir el par del motor y en vehículos automáticos si es preciso actuar sobre la unidad de control del cambio [10].

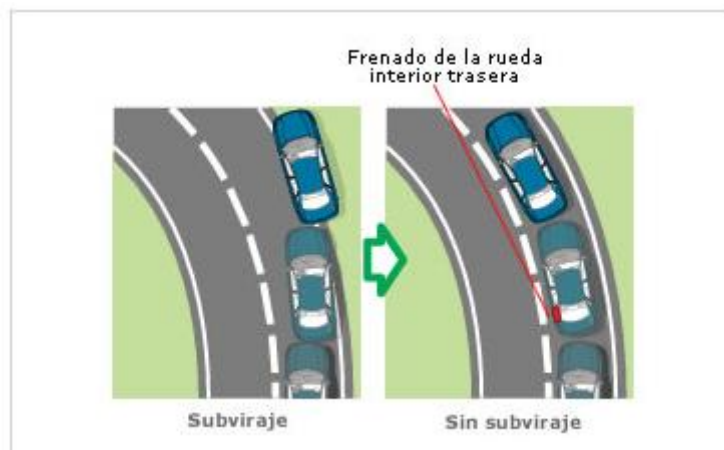
Este es el sistema de seguridad más completo y el resto de los dispositivos instalados, como por ejemplo el ABS, están subordinados al control de estabilidad. En cualquier caso, la eficacia del sistema estará siempre limitada por las condiciones del vehículo (nivel de equipamiento, los neumáticos, los componentes), las condiciones atmosféricas (nieve, hielo, mojado,...), el estado de la carretera y tráfico y por último las características del conductor, definidas por su habilidad y su estado físico y mental. Además una vez que se ha superado cierta velocidad el controlador de estabilidad no pondrá contrarrestar la pérdida de control.

El funcionamiento del sistema se basa en utilizar los frenos como herramientas para controlar la dirección del vehículo. En caso de sobreviraje, pérdida de control de la parte trasera que provoca que el coche gire más de lo deseado, el sistema actuará

sobre los frenos de las ruedas exteriores de la curva consiguiendo reducir el giro excesivo ver figura 2.1. En el caso de subviraje, el vehículo tiende a seguir recto en la curva, el sistema actuará sobre los frenos de las ruedas del interior de la curva ver figura 2.2 [10].



*Figura 2.1: actuación del controlador en caso de sobreviraje*



*Figura 2.2: actuación del controlador en caso de subviraje*

El control de estabilidad se rige por un sistema de decisión que responde a algoritmos que en muchos casos son muy complicados y caros de implementar en los vehículos. Estos algoritmos varían en función de la marca del vehículo. En los últimos años, hay una tendencia a la mejora de los sistemas de decisión que controlan el control de estabilidad. Al principio se intentaba controlar el vehículo a través de manejar únicamente una variable, bien la velocidad de guiñada o bien el ángulo de deriva. A

pesar de que se lograban buenos resultados el problema al que se enfrentaban era que para obtener la respuesta deseada hay que controlar ambas variables simultáneamente. La única desventaja que presentan estos sistemas sobre los que controlan una única variable, es la necesidad de diseñar y desarrollar dos sistemas activos para controlar ambas variables, aumentando consecuentemente el coste del vehículo.

En este estudio se utilizará un controlador de estabilidad que emplea la lógica borrosa o *fuzzy* que controlará tanto el ángulo de dirección como la velocidad de guiñada. Las ventajas que presenta la lógica borrosa frente a otros métodos de decisión son su simplicidad y que permite controlar sistemas no lineales obteniendo buenos resultados. Lo bueno de emplear sistemas no lineales es que se consigue simular el comportamiento del vehículo de tal manera que se parece lo más posible a la realidad.

## **3. MODELO DE VEHÍCULO**

La utilización de simulaciones para el desarrollo de un sistema exitoso esta a la orden del día en las empresas. Esto se debe a que con estas pruebas se reducen en gran medida el tiempo de diseño del sistema, el coste de experimentar y se disminuyen los riesgos de error al manejar un sistema real. Las simulaciones son ideales para aquellos proyectos en los que sea necesario ver el proceso o para el diseño de los sistemas cuya complejidad sea difícil o imposible de definir en una plantilla.

### **3.1. MODELO DE VEHÍCULO INICIAL**

#### **3.1.1. MODELO MATEMÁTICO**

Para simular el comportamiento dinámico de un vehículo, se utilizan modelos matemáticos. Lo que hace que la simulación sea más o menos real es el número de grados de libertad que tenga el modelo matemático empleado. Para representar el comportamiento dinámico de un vehículo en este proyecto se utilizó un modelo matemático de nueve grados de libertad. Para el cálculo de algunas variables que se necesita su valor en tiempo real se utilizó un modelo matemático de tres grados de libertad como observador [6].

### 3.1.1.1. MODELO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD

Es un modelo simplificado que simula el comportamiento de las ruedas de manera simultánea y dependiente. Además considera que el vehículo puede tener velocidad de guiñada, aceleración lateral y aceleración longitudinal. Las ecuaciones por las que se rige son las siguientes:

#### Movimiento longitudinal:

El movimiento longitudinal, representa el desplazamiento del vehículo según el eje X.

$$m \cdot \dot{U} = m \cdot V \cdot W + F_{xjL} + F_{xjR} + F_{xrL} + F_{xrR} \quad (3.1)$$

#### Fuerzas longitudinales:

- Rueda delantera izquierda

$$F_{xjL} = f_{xjL} \cdot \cos \delta_{wf} - f_{yjL} \cdot \text{sen} \delta_{wf} \quad (3.2)$$

- Rueda delantera derecha

$$F_{xjR} = f_{xjR} \cdot \cos \delta_{wf} - f_{yjR} \cdot \text{sen} \delta_{wf} \quad (3.3)$$

- Rueda trasera izquierda

$$F_{xrL} = f_{xrL} \cdot \cos \delta_{wr} - f_{yrL} \cdot \text{sen} \delta_{wr} \quad (3.4)$$

- Rueda trasera derecha

$$F_{xrR} = f_{xrR} \cdot \cos \delta_{wr} - f_{yrR} \cdot \text{sen} \delta_{wr} \quad (3.5)$$

Introduciendo las ecuaciones 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 en la expresión del movimiento longitudinal, la velocidad longitudinal queda en función de las fuerzas longitudinales y laterales del neumático, que varían en función del modelo de neumático utilizado, y del ángulo total girado por cada rueda, [6].

$$m \cdot \dot{U} = m \cdot V \cdot W + 2f_{xjf} \cdot \cos \delta_{wf} - 2f_{yjf} \cdot \text{sen} \delta_{wf} + 2f_{xjr} \cdot \cos \delta_{wr} - 2f_{yjr} \cdot \text{sen} \delta_{wr} \quad (3.6)$$



### Movimiento lateral:

El movimiento lateral describe el desplazamiento del vehículo según el eje Y.

$$m \cdot \dot{V} = -m \cdot U \cdot W + F_{YfL} + F_{YfR} + F_{YrL} + F_{YrR} \quad (3.7)$$

### Fuerzas laterales:

- Rueda delantera izquierda

$$F_{YfL} = f_{XfL} \cdot \text{sen} \delta_{Wf} + f_{YfL} \cdot \cos \delta_{Wf} \quad (3.8)$$

- Rueda delantera derecha

$$F_{YfR} = f_{XfR} \cdot \text{sen} \delta_{Wf} + f_{YfR} \cdot \cos \delta_{Wf} \quad (3.9)$$

- Rueda trasera izquierda

$$F_{YrL} = f_{XrL} \cdot \text{sen} \delta_{Wr} + f_{YrL} \cdot \cos \delta_{Wr} \quad (3.10)$$

- Rueda trasera derecha

$$F_{YrR} = f_{XrR} \cdot \text{sen} \delta_{Wr} + f_{YrR} \cdot \cos \delta_{Wr} \quad (3.11)$$

Incluyendo el valor de las fuerzas laterales, dado por las expresiones de la ecuación 3.8 a la 3.11, en la expresión 3.7 se obtiene la ecuación 3.12:

$$m \cdot \dot{V} = -m \cdot U \cdot W + 2f_{Xfj} \cdot \text{sen} \delta_{Wf} + 2f_{Yfj} \cdot \cos \delta_{Wf} + 2f_{Xrj} \cdot \text{sen} \delta_{Wr} + 2f_{Yrj} \cdot \cos \delta_{Wr} \quad (3.12)$$

#### **3.1.1.2. VELOCIDAD DE GUIÑADA**

Por velocidad de guiñada se entiende la velocidad angular (rotación por periodo de tiempo) del giro alrededor del eje vertical que pasa por su centro de gravedad del vehículo, es decir, por el eje Z, [6].

$$I_{ZZ} \cdot \dot{\omega} = a \cdot (F_{yfL} + F_{yfR}) - b \cdot (F_{yrL} + F_{yrR}) + C_{del} \cdot (F_{xfL} - F_{xfR}) + C_{tras} \cdot (F_{xrL} - F_{xrR}) \quad (3.13)$$

Al sustituir las fuerzas longitudinales del vehículo por las ecuaciones de la 3.2 a la 3.5 y las fuerzas laterales por las ecuaciones de la 3.8 a la 3.11, se obtiene la expresión 3.14:

$$I_{ZZ} \cdot \dot{\omega} = a \cdot (2f_{xfj} \cdot \sin \delta_{wf} + 2f_{yff} \cdot \cos \delta_{wf}) - b \cdot (2f_{xrf} \cdot \sin \delta_{wr} + 2f_{yrf} \cdot \cos \delta_{wr}) \quad (3.14)$$

### 3.1.1.3. VELOCIDAD ANGULAR DE CADA RUEDA

Para el cálculo de la velocidad angular de cada rueda se considera que el vehículo es de tracción delantera, por lo tanto el par de tracción,  $T_{rueda}$ , solo se tendrá en cuenta en las ecuaciones de las ruedas delanteras, [6].

- Rueda delantera izquierda

$$\dot{\omega}_{fL} = \frac{1}{I_{rueda}} [T_{rueda} - T_{frenado\_fL} - R \cdot F_{xfL} - d_{rod} \cdot F_{zfL}] \quad (3.15)$$

- Rueda delantera derecha

$$\dot{\omega}_{fR} = \frac{1}{I_{rueda}} [T_{rueda} - T_{frenado\_fR} - R \cdot F_{xfR} - d_{rod} \cdot F_{zfR}] \quad (3.16)$$

- Rueda trasera izquierda

$$\dot{\omega}_{rL} = \frac{1}{I_{rueda}} [-T_{frenado\_rL} - R \cdot F_{xrL} - d_{rod} \cdot F_{zrL}] \quad (3.17)$$

- Rueda trasera derecha

$$\dot{\omega}_{rR} = \frac{1}{I_{rueda}} [-T_{frenado\_rR} - R \cdot F_{xrR} - d_{rod} \cdot F_{zrR}] \quad (3.18)$$

**3.1.1.4. FUERZAS VERTICALES**

Las fuerzas verticales son la carga normal del vehículo que se distribuye entre las cuatro ruedas. Para su cálculo se ha de conocer la transferencia de carga que sufre el vehículo durante la aceleración y la frenada, [6].

- Rueda delantera izquierda

$$F_{zfl} = \frac{m \cdot g}{2} \left[ \frac{b}{(a+b)} - \frac{(\dot{U} - V \cdot W) \cdot h_{cg}}{g \cdot (a+b)} + K_r \left( \frac{h_{cg} \cdot A_Y}{2C_{del} \cdot g} \right) \right] \quad (3.19)$$

- Rueda delantera derecha

$$F_{zfr} = \frac{m \cdot g}{2} \left[ \frac{b}{(a+b)} - \frac{(\dot{U} - V \cdot W) \cdot h_{cg}}{g \cdot (a+b)} - K_r \left( \frac{h_{cg} \cdot A_Y}{2C_{del} \cdot g} \right) \right] \quad (3.20)$$

- Rueda trasera izquierda

$$F_{zrl} = \frac{m \cdot g}{2} \left[ \frac{a}{(a+b)} + \frac{(\dot{U} - V \cdot W) \cdot h_{cg}}{g \cdot (a+b)} + (1 - K_r) \left( \frac{h_{cg} \cdot A_Y}{2C_{tras} \cdot g} \right) \right] \quad (3.21)$$

- Rueda trasera derecha

$$F_{zrr} = \frac{m \cdot g}{2} \left[ \frac{a}{(a+b)} + \frac{(\dot{U} - V \cdot W) \cdot h_{cg}}{g \cdot (a+b)} - (1 - K_r) \left( \frac{h_{cg} \cdot A_Y}{2C_{tras} \cdot g} \right) \right] \quad (3.22)$$

**3.1.1.5. MODELO DE NEUMÁTICO**

Para la optimización del diseño de los sistemas de seguridad de un vehículo, es necesaria la obtención de resultados fiables en las simulaciones. Un elemento principal del vehículo son los neumáticos, pues en función del modelo que se utilice para simular su comportamiento los resultados varían en gran medida. El objetivo es conseguir modelos teóricos, que a pesar de sus simplificaciones respecto de la realidad, logren simular un comportamiento muy parecido. Para este estudio se utilizará un modelo de neumático no lineal. En este modelo se tiene cuenta que las

fuerzas laterales del neumático son funciones no lineales con respecto a varios parámetros, como son el ángulo de deriva y a la carga normal entre otros [6].

## **3.2. INTRODUCCIÓN DE *CARSIM***

Un gran número de empresas que se dedican al mundo del automóvil emplean el programa de simulación *CarSim* para estudiar el comportamiento dinámico del vehículo en distintas situaciones. Este programa permite variar algunas de las características tanto del vehículo como las condiciones de su entorno para después mostrar una simulación del comportamiento dinámico del coche en esa situación. El realismo de este programa y su alto grado de eficacia permite obtener mucha información verídica con la que poder trabajar [4]. Otra ventaja que presenta este programa proviene que se puede combinar con otros programas como por ejemplo *Simulink*.

### **3.2.1. MODELO DE VEHÍCULO DE *CARSIM***

Para el sistema de estabilidad propuesto se utilizará el modelo de vehículo que proporciona el programa *CarSim*. El modelo matemático que se utilizará representa el comportamiento mecánico de un vehículo de 15 GDL, teniendo en cuenta cómo afectará el motor al comportamiento, utilizará 110 ecuaciones diferenciales ordinarias para conocer la dinámica de los componentes como pueden ser la temperatura del líquido

de frenos y el combustible y por ultimo tiene cerca de 200 variables que definirán el estado del sistema [2]. Además propone herramientas más avanzadas para visualizar y calificar los resultados obtenidos en los ensayos [4].

### **3.3. MODELO DE UN CONTROLADOR DE ESTABILIDAD**

Ambos controladores de estabilidad tienen en común el funcionamiento del modelo, es decir, comparten los valores de referencia, el modelo de 3 grados de libertad, controlador con lógica *fuzzy*, distribuir de fuerzas de frenado y el modelo completo del vehículo *CarSim*. La diferencia entre ellos son los rangos de acción que se otorgan a las variables tanto de entrada como de salida.

#### **3.3.1. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO**

El modelo de control diseñado queda definido por cuatro bloques fundamentales que son, valores de referencia, modelo de tres grados de libertad, *CarSim* y Controlador con lógica *fuzzy* que además incluye el distribuidor de las fuerzas de frenado. A continuación se detallará cada uno de los bloques. A continuación se añade una representación del esquema de funcionamiento del modelo, ver figura 3.1 y una tabla que indica la nomenclatura que se ha utilizada en el esquema, ver tabla 3.1.

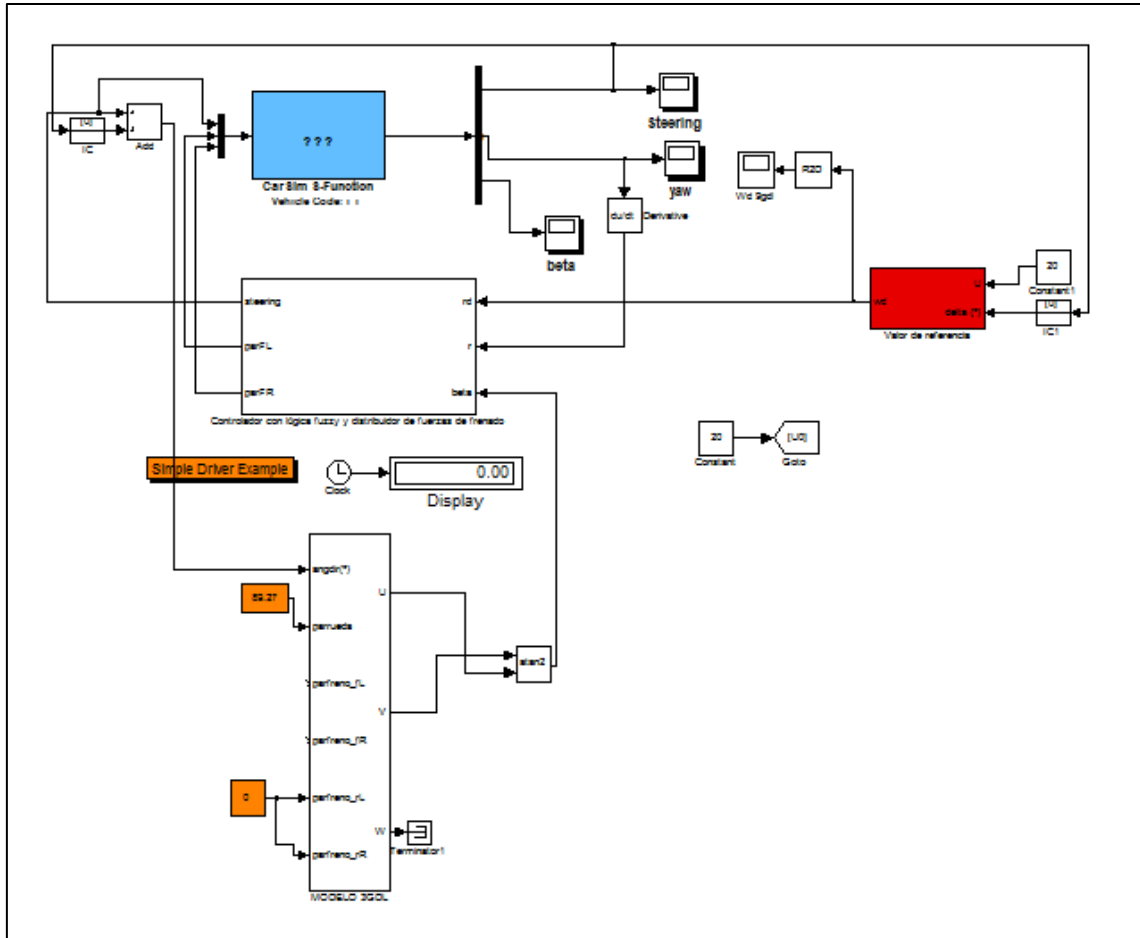


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del modelo

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
$\delta_f$	Ángulo de dirección en las ruedas delanteras	Grados
$\delta_a$	Valor de control sobre el ángulo de dirección	Grados
$M_z$	Valor de control sobre el momento de guiñada	rad/s
$T_{brL}$	Par de frenada sobre la rueda delantera izquierda	N.m
$T_{brR}$	Par de frenada sobre la rueda delantera derecha	N.m
$W_{completo}$	Velocidad de guiñada obtenida del modelo completo	rad/s
$\beta_d$	Valor ideal de $\beta$	Grados

$W_d$	Valor ideal de la velocidad de guiñada	rad/s
$U_3$	Velocidad longitudinal obtenida del modelo de tres grados de libertad	m/s
$\beta_3$	Ángulo de deslizamiento lateral del vehículo obtenido del modelo de tres grados de libertad	Grados

*Tabla 3.1: Nomenclatura utilizada en el esquema del funcionamiento del modelo*

#### 3.3.1.1. VALORES DE REFERENCIA

El objetivo de este bloque es obtener el valor de la velocidad de guiñada óptima para cada caso, para ello se utiliza la ecuación 3.1. Para realizar el cálculo se necesita introducir la velocidad longitudinal del vehículo que se mantiene constante durante toda la trayectoria y el ángulo de dirección introducido por el conductor, este valor se obtiene del bloque *CarSim*.

$$W_d = \frac{U}{(a+b)(1+0.005U^2)} \delta_f \quad (3.1)$$

Este valor se introduce en el bloque del controlador de lógica *fuzzy*.

#### 3.3.1.2. MODELO DE 3 GDL

Este modelo de tres grados de libertad gracias a su simplicidad y velocidad de cálculo comparado con el modelo completo se utilizará como el observador del sistema. Su objetivo es obtener el valor de beta que es ángulo de deriva que sufre el vehículo, el valor ideal de esta variable es cero. Este valor se calcula teniendo en cuenta el ángulo de dirección introducido al bloque *CarSim* y el que se calcula en el mismo bloque. Empleando como observador un modelo de tres grados de libertad como observador se ha de tener en cuenta que se pierde precisión en el cálculo pero se consigue mayor velocidad de cálculo que evita posibles retrasos que podrían empeorar el comportamiento del vehículo.

#### **3.3.1.3. CONTROLADOR CON LÓGICA *FUZZY* Y DISTRIBUIR DE FUERZAS DE FRENADO**

El controlador con lógica difusa utiliza el valor de beta que proviene del modelo de tres grados de libertad, el momento de guiñada que calcula el bloque de *CarSim* y el resultado de la velocidad de guiñada deseado. Con estos valores calcula un nuevo valor de la velocidad de guiñada que se empleará para recalcular el valor de beta y en comportamiento del vehículo durante la simulación.

El objetivo del distribuidor de fuerzas de frenado es calcular y aplicar la fuerza necesaria sobre las ruedas delanteras del vehículo para intentar corregir la trayectoria del vehículo en cada caso.

#### **3.3.1.4. MODELO COMPLETO DE VEHÍCULO *CARSIM***

Este es el bloque que representa el comportamiento del vehículo través de los valores que obtiene del controlador de lógica *fuzzy* y el distribuidor de fuerzas de frenado. Con estos datos y los de la trayectoria que ha de seguir el vehículo realiza una representación visual y vuelve a calcular el valor de la velocidad de guiñada y el ángulo de dirección introducido por el conductor.



## 4. LÓGICA BORROSA

Para este proyecto el método elegido para la implementación del control de estabilidad es el de la llamada lógica difusa. Cuenta con la ventaja de su sencillez frente a otros sistemas propuestos y además presentará buenos resultados. En este capítulo se mostrará una explicación de cómo funciona la lógica borrosa antes de entrar en los aspectos técnicos del diseño de los dos controladores de estabilidad.

### 4.1. LÓGICA BORROSA

La lógica difusa ha surgido como una herramienta importante para el control de subsistemas y procesos industriales complejos. Este método ha cobrado una gran fama por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde artefactos electrónicos de uso doméstico hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática. Esta tecnología se inventó en Estados Unidos en 1965 por *Lofti A. Zadeh* [7].

La necesidad de que se creara este tipo de lógica proviene de la dificultad de trabajar con información imprecisa y que no está bien definida utilizando la lógica clásica. Esta última impone únicamente a sus enunciados valores determinantes como pueden ser verdaderos o falsos. La lógica borrosa pertenece a la lógica multivaluada y además permite introducir valores intermedios entre la afirmación completa y la negación

absoluta [8]. Este tipo de lógica utiliza expresiones que no son totalmente ciertas ni totalmente falsas, es decir, es una lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor indeterminado de veracidad dentro de un conjunto de valores cuyos extremos son la verdad absoluta o la falsedad absoluta.

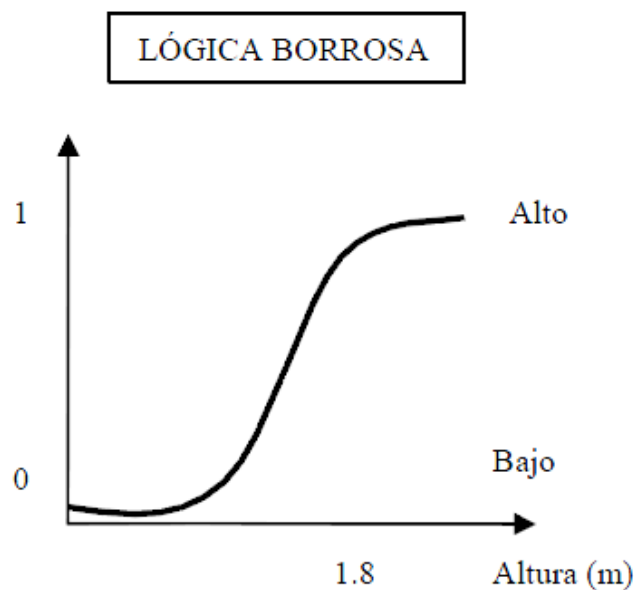
A diferencia de la lógica Booleana, la lógica difusa considera un número infinito de valores entre cierto y falso. Por tanto algunas cosas pueden ser parcialmente verdaderas y parcialmente falsas al mismo tiempo. Por ejemplo un vaso puede estar medio lleno o medio vacío.

En esencia un controlador de lógica borrosa o difusa se basa en la relatividad de lo observado.

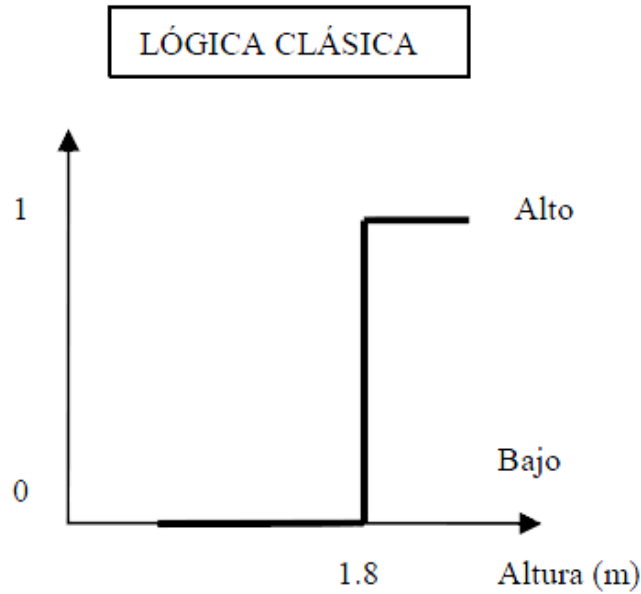
## 4.2. CONJUNTOS DIFUSOS

Un conjunto difuso puede ser visto como una generalización del conjunto binario que toma solo los valores 0 ó 1. En la lógica bivaluada la transferencia de un estado a otro es instantáneo mientras que en la lógica difusa la transición es gradual. Para ilustrar el concepto de la lógica difusa y los conjuntos difusos se utilizará un ejemplo. Se definirá utilizando tanto la lógica booleana como la difusa el conjunto de los hombres altos. Según la teoría de lógica clásica al conjunto de hombres altos solo pertenecen los que miden más de una determinada altura y esa altura límite es 1.80 metros, así un hombre es considerado alto cuando mide por ejemplo 1.81 metros y uno bajo cuando mide 1.79 metros. Esto no parece una razón muy lógica para catalogar a un hombre de alto o bajo ya que por ejemplo en el caso expuesto la altura de uno a otro solo se diferencia en 2 centímetros. Ahí, en casos como este donde no es fácil catalogar algo por eso se introduce la lógica borrosa. Según la lógica borrosa, el conjunto de

“hombres altos” es un conjunto que no tiene una frontera clara que indique que perteneces a ese grupo o no. El evaluar si un hombre es alto o bajo, se hace mediante una función que define la transición entre alto a bajo y para ello asigna a las distintas alturas un valor entre 0 y 1. Según sea este valor se considera que se pertenece al conjunto o no. Aplicando esto al caso anterior, un hombre que mida 1.79 metros se puede decir que pertenece al conjunto de hombres altos con un grado de 0.75 y el hombre que medía 1.81 metros pertenece al conjunto de hombres altos con un grado de 0.8. Si representamos esto en una gráfica se obtendrá que la transición entre alto o bajo con la lógica borrosa es una curva con cambios no abruptos, ver figura 4.1, mientras que con la lógica clásica, el paso de alto a bajo o viceversa es brusco, ver figura 4.2 [9].



*Figura 4.1: transición entre alto o bajo con la lógica borrosa*

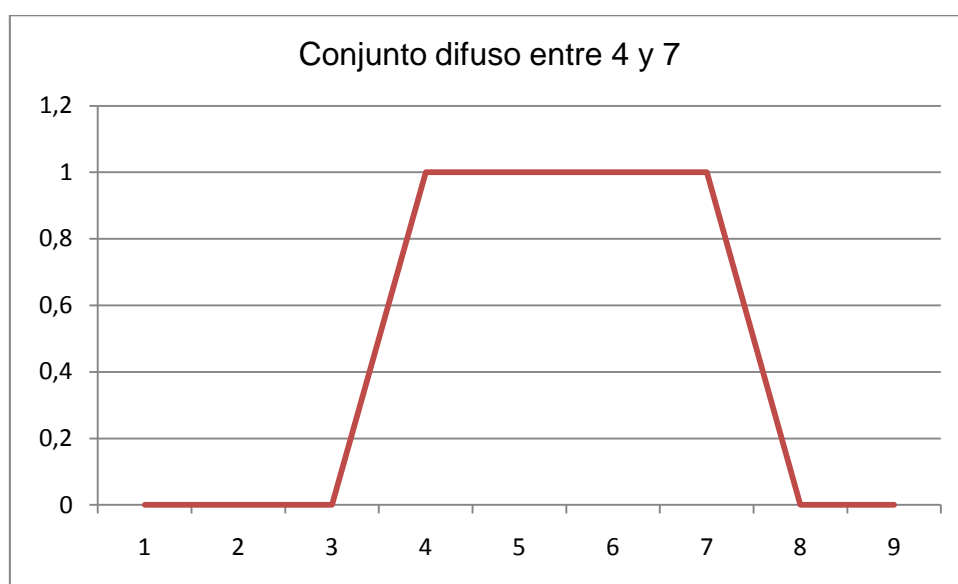


*Figura 4.2: transición entre alto o bajo con la lógica booleana*

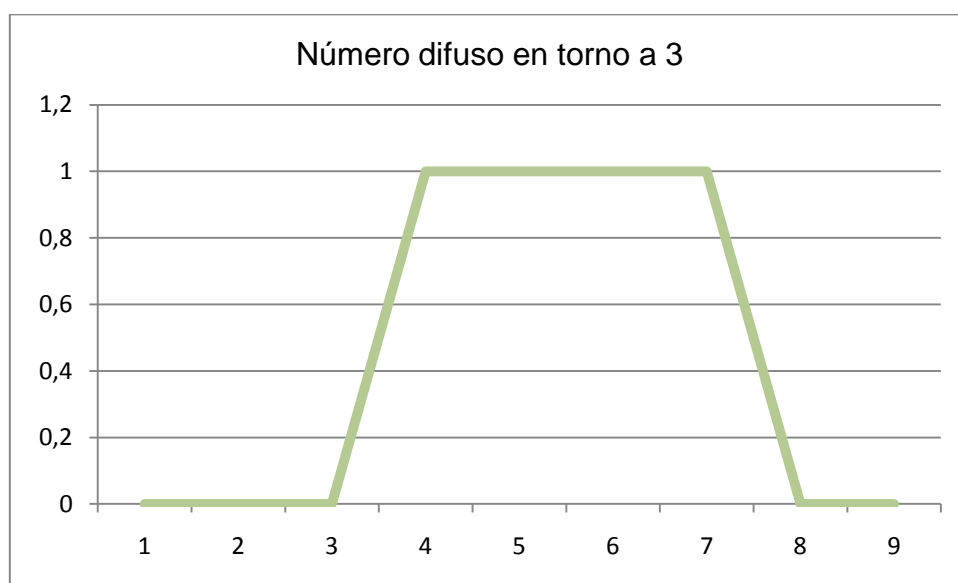
En resumen, según la lógica clásica un elemento pertenece o no pertenece al conjunto, sin embargo la lógica borrosa lo que hace es poner un grado de pertenencia al conjunto.

### 4.3. OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS

Al igual que con la lógica clásica también se puede interseccionar, unificar y negar con conjuntos difusos. En su primer artículo sobre conjuntos difusos L.A. Zadeh sugirió el operador mínimo para la intersección y el operador máximo para la unión de dos conjuntos difusos. Para explicar esto se expondrán varios ejemplos. Sea  $A$  un intervalo difuso entre 4 y 7, ver figura 4.3, y  $B$  un número difuso entorno al 3, ver figura 4.4.

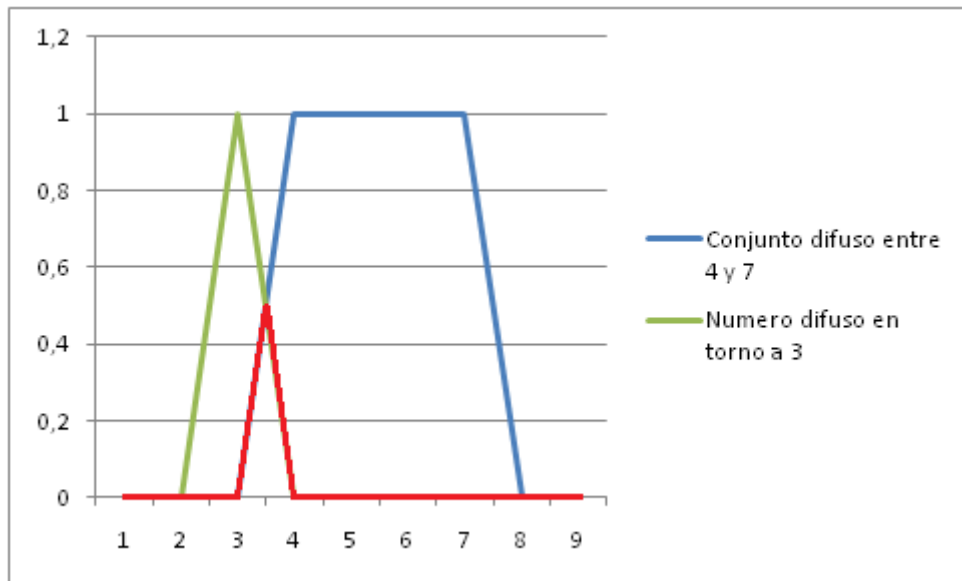


*Figura 4.3: Conjunto difuso entre 4 y 7*



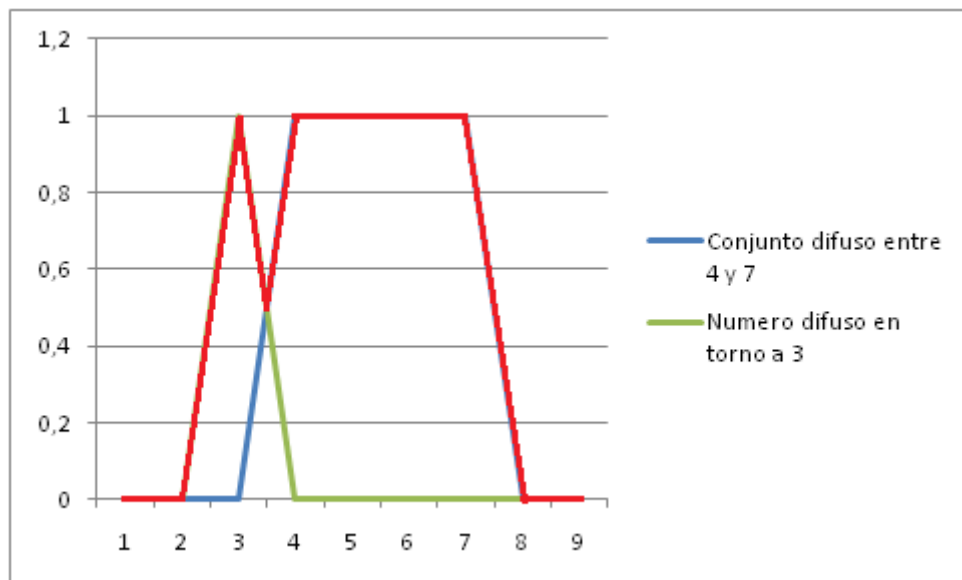
*Figura 4.4: Número difuso en torno a 3*

Operación *AND* del conjunto difuso *A* y el número difuso *B*, el resultado es la línea roja, ver figura 4.5.



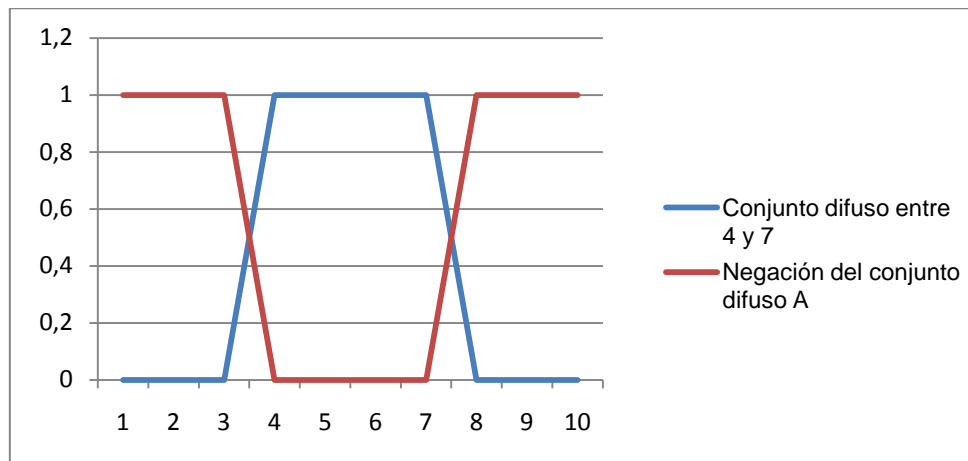
*Figura 4.5: Operación AND del conjunto difuso*

Operación OR entre los conjuntos difusos A y B, el resultado es la línea roja, ver figura 4.6.



*Figura 4.6: Operación OR del conjunto difuso*

Operación en la que se niega el conjunto difuso A, el resultado es la línea roja, ver figura 4.7.



*Figura 4.7: Negación del conjunto difuso A*

## 5. CONTROLADORES CON LÓGICA BORROSA

Los controladores más eficientes en la actualidad intentan controlar los vehículos a través de dos variables, que son la velocidad de guiñada y el ángulo de deriva del vehículo. El problema es que para conseguir la respuesta deseada, ambas variables tienen que ser controladas simultáneamente.

En este proyecto se empleará un controlador que utiliza la lógica borrosa o *fuzzy*. Hay que destacar de este método su simplicidad y añadir que permite controlar sistemas no lineales obteniendo buenos resultados [6].

El funcionamiento del controlador se basa en la medición de las entradas y en su ubicación por medio de una función de pertenencia a los posibles intervalos. Según una serie de reglas que se han definido previamente. El controlador proporciona un valor de salida en función de las entradas que se registran. Tanto las funciones de pertenencia utilizadas en las variables, como sus rangos de actuación están definidas mediante la experiencia obtenida de investigaciones anteriores. En el caso de la velocidad de guiñada, el criterio seguido fue el siguiente; se define  $f$  como  $W - W_d$ , donde  $W$  es la velocidad de guiñada real del vehículo y  $W_d$  la velocidad de guiñada deseada para que el vehículo siga una trayectoria ideal:

- Si  $f > 0$ ;  $W > 0$  y  $W_d > 0$  con  $W < W_d \Rightarrow$  el par de frenada es aplicado en la rueda delantera izquierda
- Si  $f > 0$ ;  $W < 0$  y  $W_d < 0$  con  $W < W_d \Rightarrow$  el par de frenada es aplicado en la rueda delantera izquierda



- Si  $f < 0$ ;  $W > 0$  y  $W_d > 0$  con  $W < W_d \Rightarrow$  el par de frenada es aplicado en la rueda delantera derecha
- Si  $f < 0$ ;  $W < 0$  y  $W_d < 0$  con  $W > W_d \Rightarrow$  el par de frenada es aplicado en la rueda delantera derecha

## 5.1. ESTRUCTURA DE LOS CONTROLADORES DE ESTABILIDAD

La arquitectura del controlador de lógica borrosa se compone de cuatro pasos, ver figura 5.1 [6].

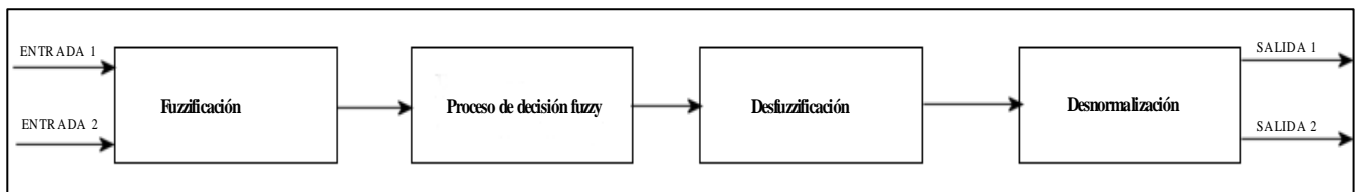


Figura 5.1: Esquema de funcionamiento del controlador con lógica fuzzy

### Fuzzificación:

Hace que las entradas sean compatibles con la condición de las reglas basadas en el conocimiento usando variables lingüísticas convenientes. En la tabla 5.1 se muestran los términos lingüísticos [6].

SIGLAS	Significado	Origen de las siglas
NB	Negativo Grande	<i>Negative Big</i>

NM	Negativo Mediano	<i>Negative Medium</i>
NS	Negativo Pequeño	<i>Negative Small</i>
ZE	Cero	<i>Zero</i>
PS	Positivo Pequeño	<i>Positive Small</i>
PM	Positivo Mediano	<i>Positive Medium</i>
PB	Positivo Grande	<i>Positive Big</i>

Tabla 5.1: Nomenclatura utilizada en el controlador de lógica borrosa

Para proporcionar cobertura de la regla en el mayor rango posible, los sistemas borrosos utilizados en este proyecto utilizan siete reglas para las variables de entrada y nueve reglas para las de salida. Este número viene recomendado por la cantidad de términos distintos que pueden manejar en un sistema los seres humanos, que oscilan entre 2 y 9 términos [6].

#### Proceso de decisión fuzzy:

Procesa una lista de reglas de la base de conocimiento y a partir de una entrada borrosa proporcionada por el módulo anterior, produce una salida borrosa

El tipo de reglas usadas para este controlador son del tipo (ver tabla 5.2, donde se muestra la variable correspondiente a cada entrada y salida):

**If (ENTRADA 1) and (ENTRADA 2) then (SALIDA 1) and (SALIDA 2)**

En función de la condición que se cumpla para ambas entradas, se generan unas salidas con un valor determinado. Esto es así, porque se ha comprobado experimentalmente que ambas entradas son dependientes y cualquier actuación sobre una de las variables de salida afecta tanto a la velocidad de guiñada, como al ángulo de deriva. Es importante destacar, que si se hubiera comprobado la independencia de ambas variables, se habría tenido que diseñar un sistema de control con dos controladores independientes, uno para cada variable de entrada [6].

<b>ENTRADA 1</b>	Diferencia entre el ángulo de deriva del vehículo y su valor deseado	$e(\beta) = \beta - \beta_d = \beta = \arctg \frac{V}{U}$
<b>ENTRADA 2</b>	Diferencia entre la velocidad de guiñada del vehículo y su valor deseado	$e(W) = W - W_d$
<b>SALIDA 1</b>	Valor de control sobre el momento de guiñada	$M_z$
<b>SALIDA 2</b>	Valor de control sobre el ángulo de dirección	$\delta_a$

Tabla 5.2: Entradas y salidas del controlador fuzzy

Defuzzificación:

Como método de defuzzificación se ha tomado el método de *Mamdani*, que está basado en la elección del valor de salida por centro de gravedad. Este método consiste en generar la unión de todas las salidas recortadas derivadas de cada una de las reglas y encontrar el centro de gravedad del área que compone esta unión, que será la salida del controlador. En este proyecto, ha necesario la utilización de la desnormalización para el diseño del controlador. Sin embargo, el uso de la normalización no se ha considerado preciso [6].

El regulador tiene que ser diseñado de modo que el punto de equilibrio esté en el cero, por dos razones:

Cuando la diferencia entre los valores reales y deseados es nula, la respuesta del controlador debe ser nula también para las salidas.

En función del signo que tenga la diferencia entre el valor real y deseado de la velocidad de guiñada, el par de frenado debe ser aplicado en la rueda delantera izquierda o en la rueda delantera derecha.

Desnormalización:

Los valores de  $\hat{M}_z$  y  $\hat{\delta}_a$  a la salida del controlador, deben ser modificados utilizando las ecuaciones 5.1 y 5.2 respectivamente, para ser incluidos en el intervalo normalizado del momento de guiñada el primero y trabajar en las mismas unidades que la dirección del vehículo el segundo [6].

$$M_z = 10000 \cdot \hat{M}_z \quad (5.1)$$

$$\delta_a = \frac{180 \cdot \pi}{R} \cdot \hat{\delta}_a \quad (5.2)$$

## 5.2. FUNCIONES DE PERTENENCIA DE VARIABLES

Como se ha comentado en apartados anteriores, las funciones de pertenencia de las cuatro variables (dos de entrada y dos de salida) utilizadas en el diseño del controlador, están compuestas por reglas lingüísticas, representadas mediante funciones triangulares y trapezoidales. El rango que cubren se ha seleccionado teniendo en cuenta la experiencia de investigaciones anteriores sobre control *fuzzy* en vehículos [1] y los resultados obtenidos en las simulaciones. El procedimiento empleado hasta la consecución de los rangos finales de cada función de pertenencia, comenzó sometiendo al vehículo a maniobras extremas, con el objetivo de averiguar los valores máximos y mínimos que podían tomar cada variable. Posteriormente se fue ajustando el intervalo de actuación de cada regla lingüística hasta que se obtuvo el resultado óptimo en las diferentes simulaciones, tanto en la velocidad de guiñada, como en el ángulo de deriva del vehículo [6].

### 5.2.1. CONTROLADOR INICIAL

El control de estabilidad que se utilizará en este estudio proviene de un trabajo anterior [5], que utiliza la lógica difusa por su simplicidad y su buen rendimiento en control de sistemas no lineales. En el trabajo anterior se pone a prueba este sistema de control de estabilidad en un modelo de vehículo de 13 GDL que presentan unos resultados favorables [5]. En este estudio se pondrá a prueba el mismo sistema de control pero en un modelo de vehículo de 15 GDL que lo pondrá el programa *CarSim*.

En las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 se presentan las funciones de pertenencia para las variables, ángulo de deslizamiento, velocidad de guiñada, momento de guiñada, ángulo de dirección. En estos gráficos, el eje X representa el valor real o normalizado de la variable, con unidades de radianes para el ángulo de deriva, mientras que para la velocidad de guiñada las unidades son radianes/segundo. El eje Y, indica el peso que tiene cada una de las funciones que representan cada variable lingüística en función del valor del eje X que se considere.

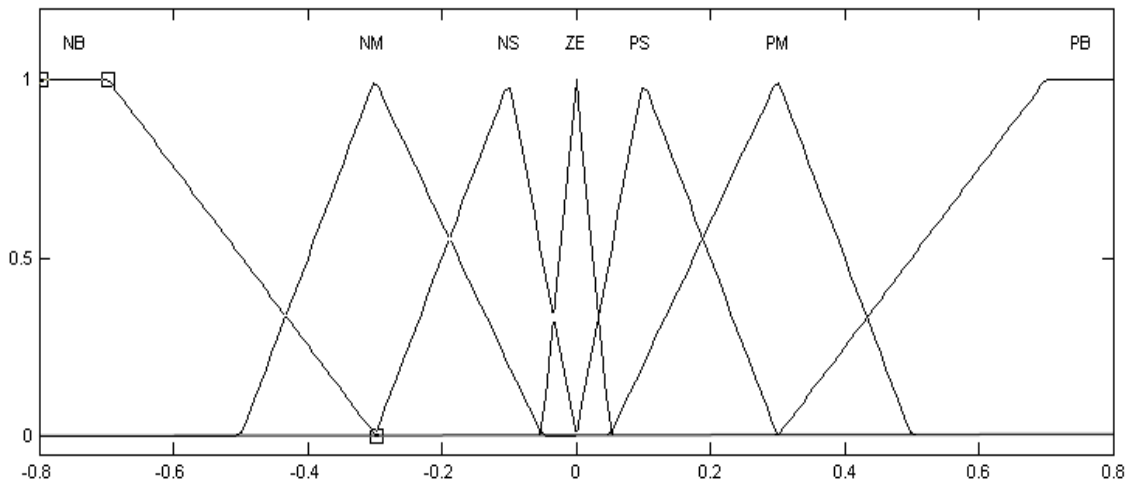


Figura 5.2: Variable de entrada al controlador inicial  $\beta - \beta_d$

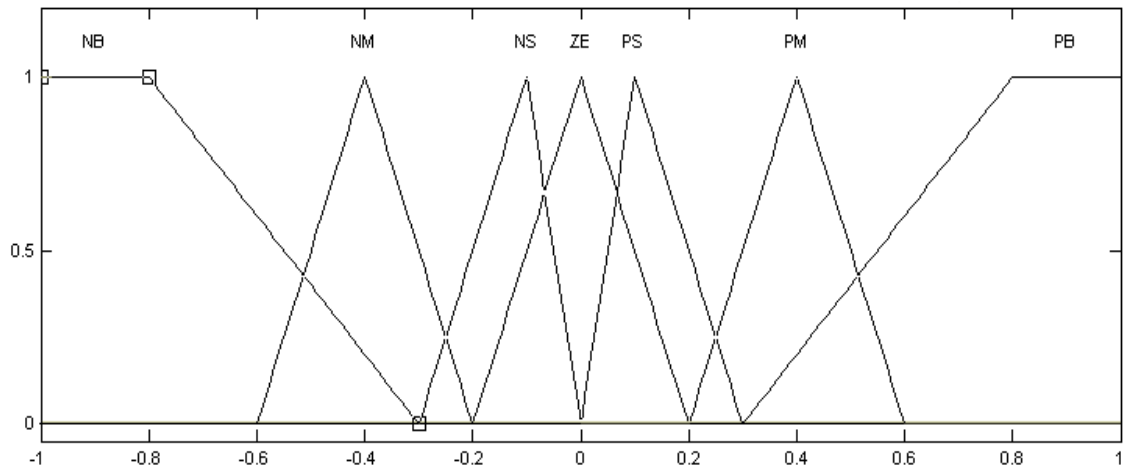


Figura 5.3: Variable de entrada al controlador inicial  $W - W_d$

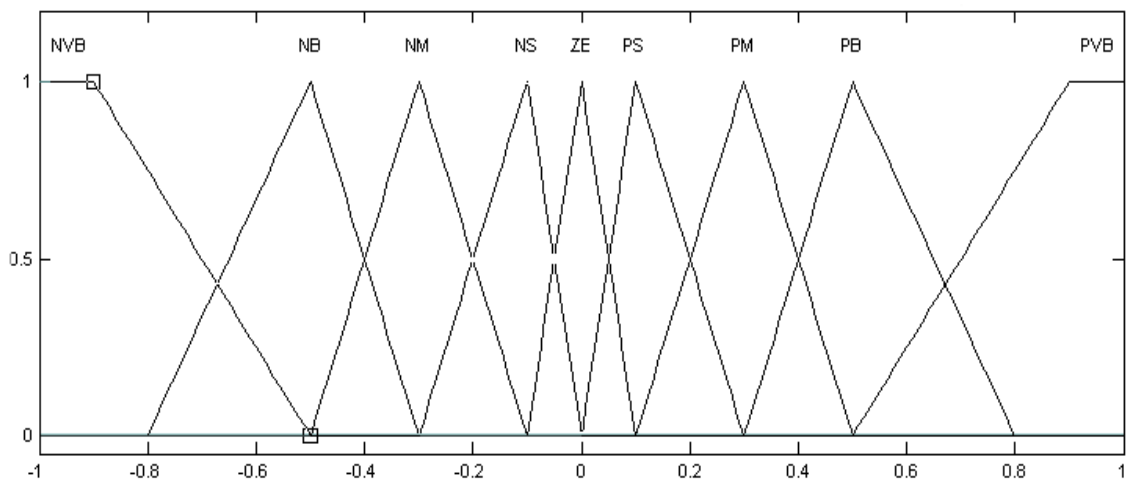


Figura 5.4: Variable de salida del controlador inicial  $M_z$

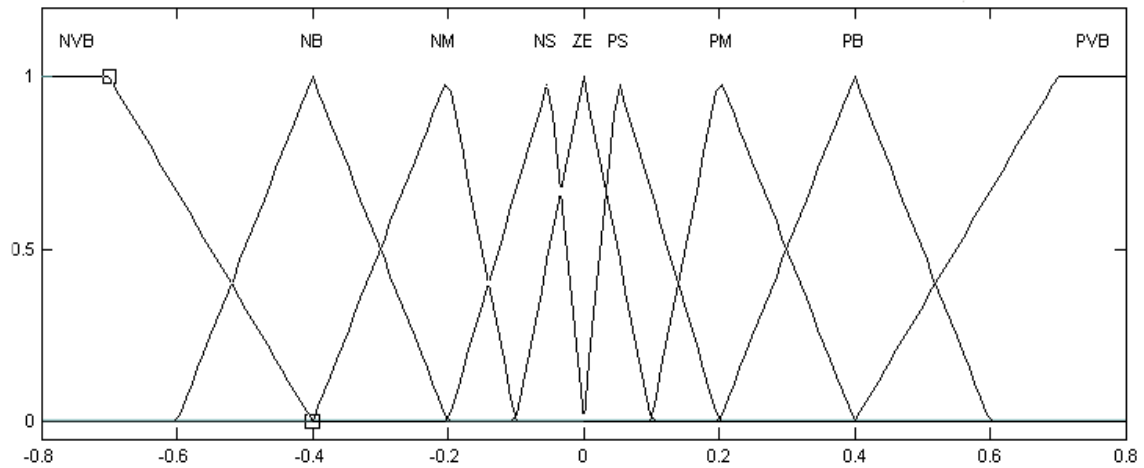


Figura 5.5: Variable de salida del controlador inicial  $\delta_a$

Las reglas que dictaminan los valores de las variables de salida se pueden ver en la tabla 5.3.

Regla	$e(\beta)$	$e(W)$	$\hat{M}_z$	$\hat{\delta}_a$	Peso
1	NB	PB	PB	NVB	1
2	NM	PB	PM	NVB	1
3	NS	PB	NM	NVB	1
4	ZE	PB	ZE	NB	1
5	PS	PB	NM	NVB	1
6	PM	PB	NVB	NVB	1
7	PB	PB	NVB	NVB	1
8	NB	PM	PM	NB	1
9	NM	PM	PS	NB	1
10	NS	PM	NS	NB	1
11	ZE	PM	ZE	NM	1
12	PS	PM	NS	NB	1
13	PM	PM	NB	NB	1
14	PB	PM	NVB	NB	1

15	NB	PS	PS	NB	1
16	NM	PS	PS	NM	1
17	NS	PS	ZE	NM	1
18	ZE	PS	ZE	ZE	1
19	PS	PS	NM	NS	1
20	PM	PS	NB	NS	1
21	PB	PS	NM	NS	1
22	NB	ZE	PVB	ZE	1
23	NM	ZE	PB	ZE	1
24	NS	ZE	PM	NS	1
25	ZE	ZE	ZE	ZE	1
26	PS	ZE	NM	ZE	1
27	PM	ZE	NB	ZE	1
28	PB	ZE	NVB	ZE	1
29	NB	NS	PM	PS	1
30	NM	NS	PB	PS	1
31	NS	NS	PM	NS	1
32	ZE	NS	ZE	ZE	1
33	PS	NS	ZE	PM	1
34	PM	NS	NS	PM	1
35	PB	NS	NS	PB	1
36	NB	NM	PVB	PB	1
37	NM	NM	PB	PB	1
38	NS	NM	PS	PB	1
39	ZE	NM	ZE	PM	1
40	PS	NM	PS	PB	1
41	PM	NM	NS	PB	1
42	PB	NM	NM	PB	1
43	NB	NB	PVB	PVB	1
44	NM	NB	PVB	PVB	1
45	NS	NB	PM	PVB	1



46	ZE	NB	ZE	PB	1
47	PS	NB	PM	PVB	1
48	PM	NB	NM	PVB	1
49	PB	NB	NM	PVB	1

Tabla 5.3: Reglas del controlador de lógica borrosa inicial

### 5.2.2. CONTROLADOR DE ESTABILIDAD PROPUESTO

Sea creado un controlador que en casi todos los casos supera al controlador inicial y en el resto hacen casi lo mismo. En las figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 se presentan las funciones de pertenencia de cada variable del controlador de estabilidad que se ha utilizado tanto en los casos de doble cambio de línea como en las curvas y en el *J-turn*. Este controlador en función de si el asfalto está seco o con hielo sigue unas reglas diferentes. Los rangos de acción son los mismos pero con diferentes reglas, con esto se consiguen mejores resultados.

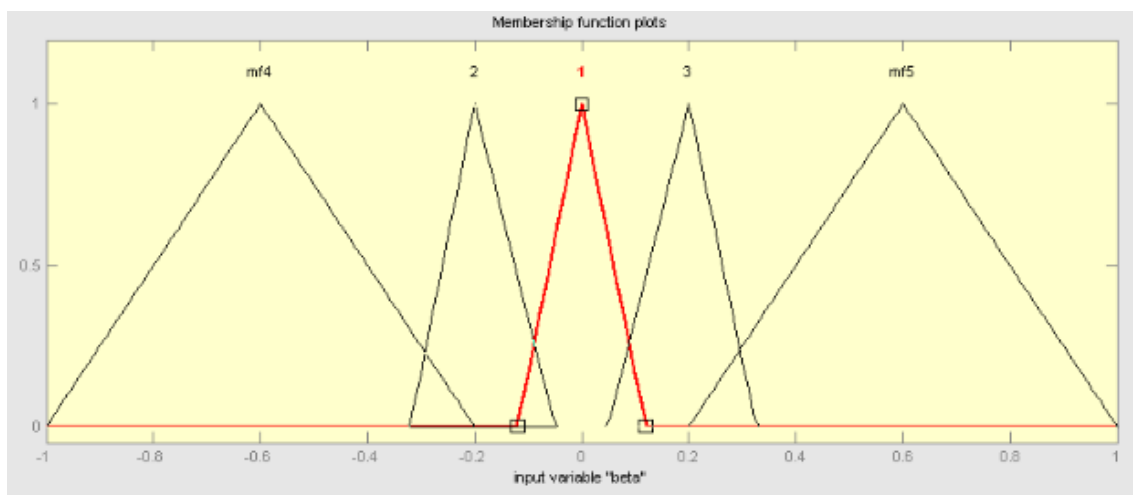


Figura 5.6: Variable de entrada al controlador propuesto  $\beta - \beta_d$

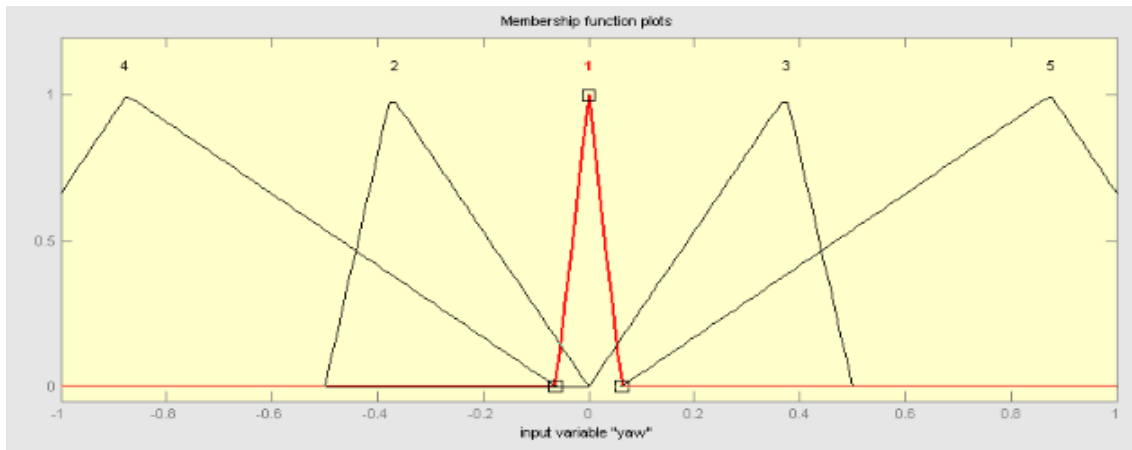


Figura 5.7: Variable de entrada al controlador propuesto  $W - W_d$

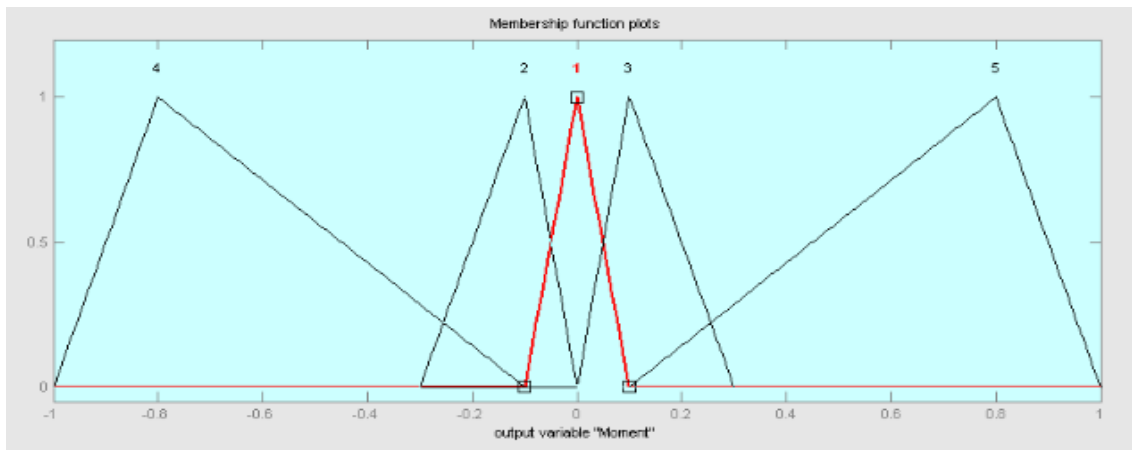


Figura 5.8: Variable de salida del controlador propuesto  $M_z$

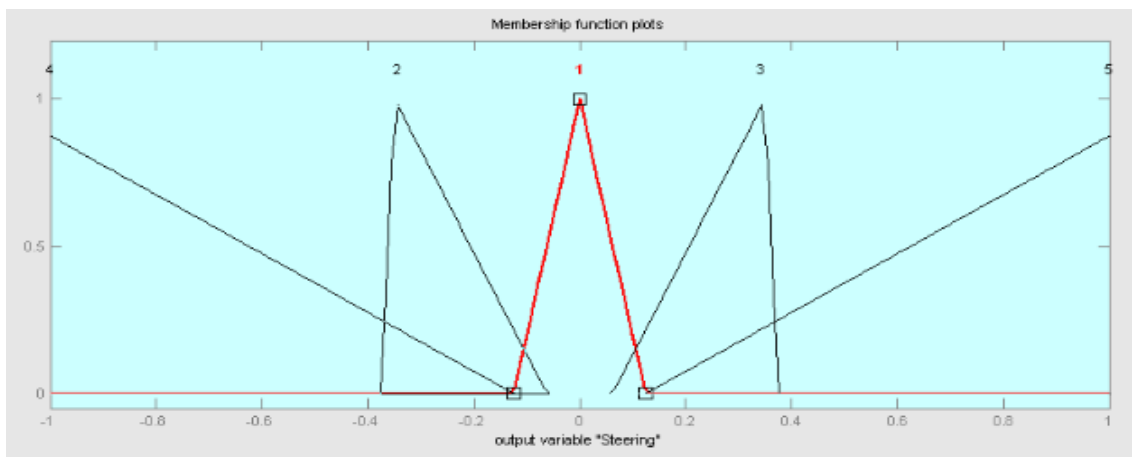


Figura 5.9: Variable de salida del controlador propuesto  $\delta_a$

Las reglas que dictaminan los valores de las variables de salida en el controlador propuesto en el caso de que el asfalto este seco se pueden ver en la tabla 5.4.

Regla	$e(W)$	$e(\beta)$	$\hat{\delta}_a$	$\hat{M}_z$	Peso
1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	1
3	1	3	1	1	1
4	1	4	1	1	1
5	1	5	1	1	1
6	2	1	2	1	1
7	2	2	2	1	1
8	2	3	2	1	1
9	2	4	2	1	1
10	2	5	2	1	1
11	3	1	3	1	1
12	3	2	3	1	1
13	3	3	3	1	1
14	3	4	3	1	1
15	3	5	3	1	1
16	4	1	4	1	1
17	4	2	4	3	1
18	4	3	4	2	1
19	4	4	4	3	1
20	4	5	4	2	1
21	5	1	5	1	1
22	5	2	5	3	1
23	5	3	5	2	1
24	5	4	5	3	1
25	5	5	5	2	1

Tabla 5.4: Reglas del controlador de lógica borrosa propuesto en seco

Las reglas que dictaminan los valores de las variables de salida en el controlador propuesto en el caso de que el asfalto este con hielo se pueden ver en la tabla 5.5.

Regla	$e(W)$	$e(\beta)$	$\hat{\delta}_a$	$\hat{M}_z$	Peso
1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	3	1
3	1	3	1	2	1
4	1	4	1	5	1
5	1	5	1	4	1
6	2	1	2	1	1
7	2	2	2	3	1
8	2	3	2	2	1
9	2	4	2	5	1
10	2	5	2	4	1
11	3	1	3	1	1
12	3	2	3	3	1
13	3	3	3	2	1
14	3	4	3	5	1
15	3	5	3	4	1
16	4	1	4	1	1
17	4	2	4	5	1
18	4	3	4	4	1
19	4	4	4	5	1
20	4	5	4	4	1
21	5	1	5	1	1
22	5	2	5	5	1
23	5	3	5	4	1
24	5	4	5	5	1
25	5	5	5	4	1

Tabla 5.5: Reglas del controlador de lógica borrosa propuesto en hielo

## 6. CONEXIÓN DE *CARSIM* CON EL MODELO *FUZZY*

Para poder alcanzar el objetivo final de este proyecto se necesitará combinar los programas *CarSim*, *Simulink* y un compilador del lenguaje de programación “C”, en este caso se ha utilizado el compilador “Lcc-win32 C 2.4.1”. Con el primer programa se crearan los datos físicos tanto del vehículo como del entorno, con el segundo se creará el controlador de estabilidad y con el tercero se construyen los controladores de estabilidad que utilizan la lógica difusa.

Ambos sistemas de control de estabilidad están creados con una herramienta del programa *Matlab*, concretamente *Simulink*. Entre los capítulos tres y cuatro se definen las partes que forman el sistema que se pueden ver en la figura 6.1. Para poder utilizar el sistema con el programa *CarSim* el archivo debe de estar en formato “.mdl” y guardarlo en la carpeta “CarSim » Programs » Simulink\_MDL”.

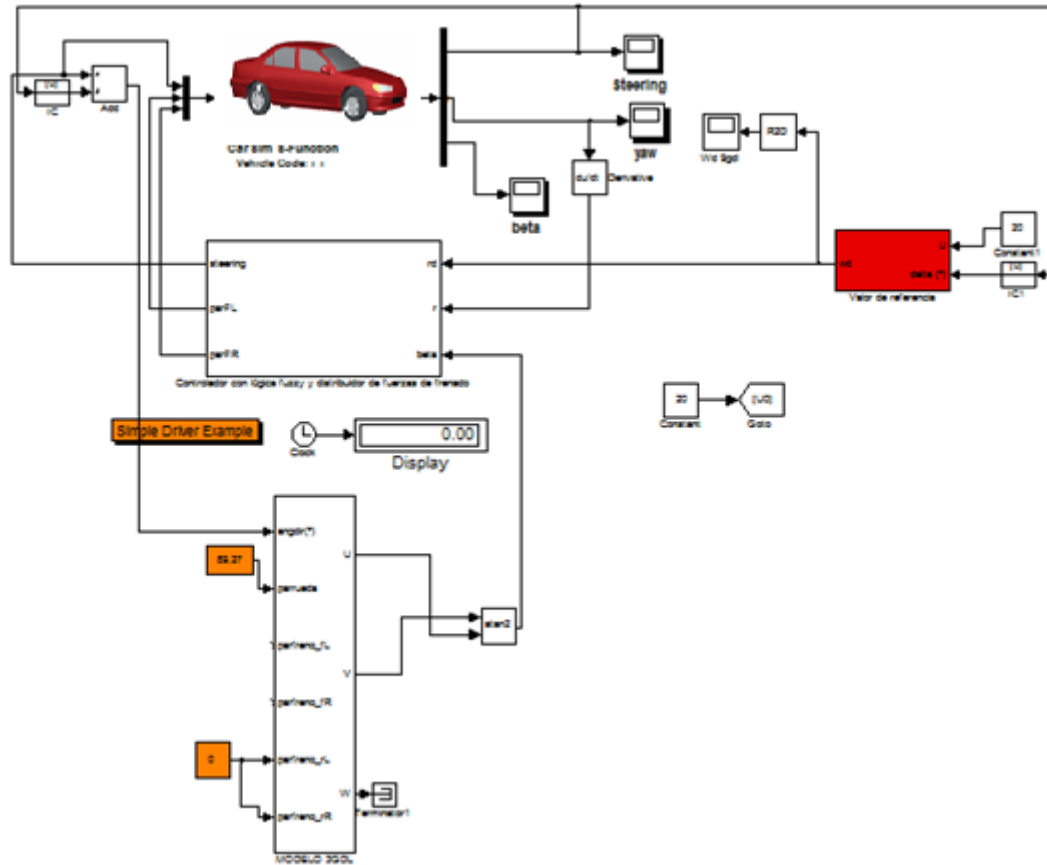


Figura 6.1: Esquema de funcionamiento del modelo matemático

Para que el simulador utilice este archivo se deberá de modificar algunos parámetros de la ventana inicial, ver figura 6.2.

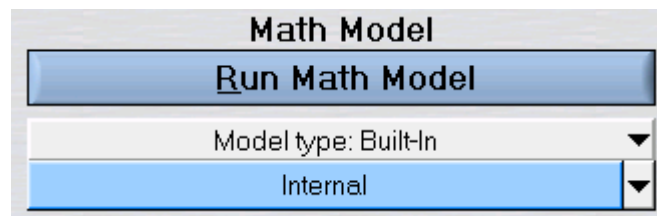


Figura 6.2: Ventana del modelo matemático

Si se desea introducir un modelo matemático externo al programa se deberá de escoger uno de los modos que aparecen en la lista si se pulsa en la flecha marcada en rojo de la figura 6.3.

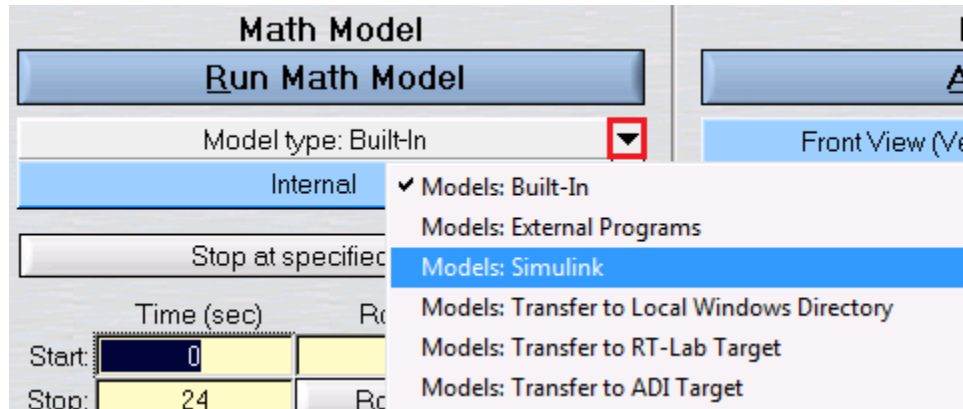


Figura 6.3: Lista de modelos matemáticos

En el caso de que se eligiese utilizar el programa *Simulink* se debería de escogerlo de esta lista. Una vez que sea pinchado sobre “Models: Simulink” aparecerá un nuevo formato de ventana del modelo matemático, ver figura 6.4.

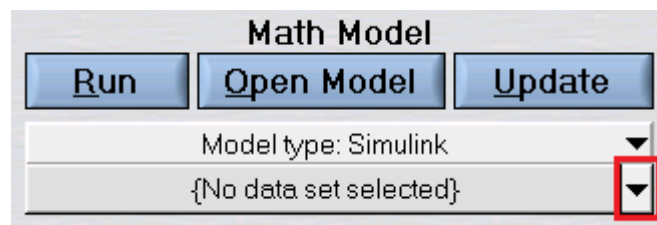


Figura 6.4: Ventana del modelo matemático de Simulink

Pinchando sobre la flecha marcada en la figura 6.4 aparecerá la lista de los modelos que hay escritos en *Simulink* y se escogerá el que nosotros hayamos creado previamente, en nuestro caso “Simple Driver Model”, ver figura 6.5.

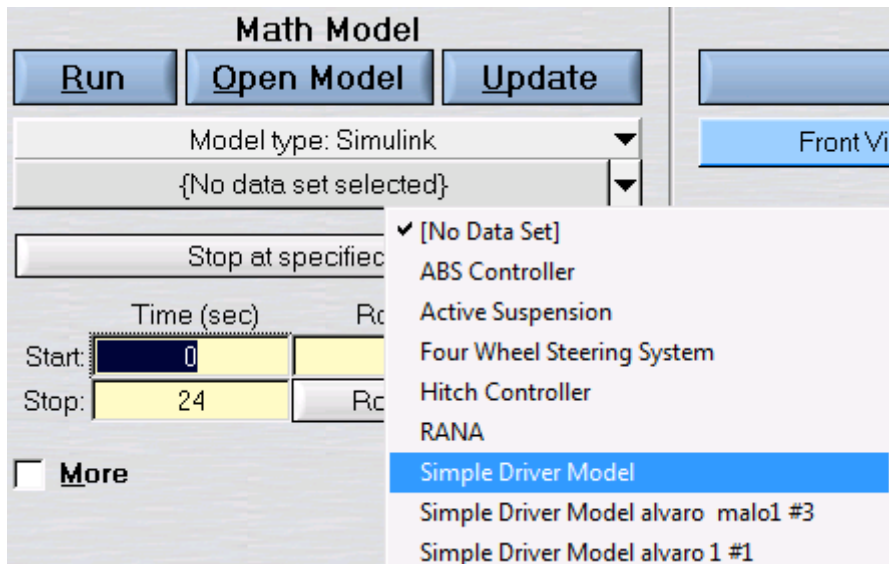


Figura 6.5 Elección del modelo matemático escogido

Para que el programa selecciona desde la ventana que aparecerá si se pincha en el icono que hay debajo del título “Model type: Simulink” en la pantalla inicial del programa *CarSim*, ver Figura 6.6.

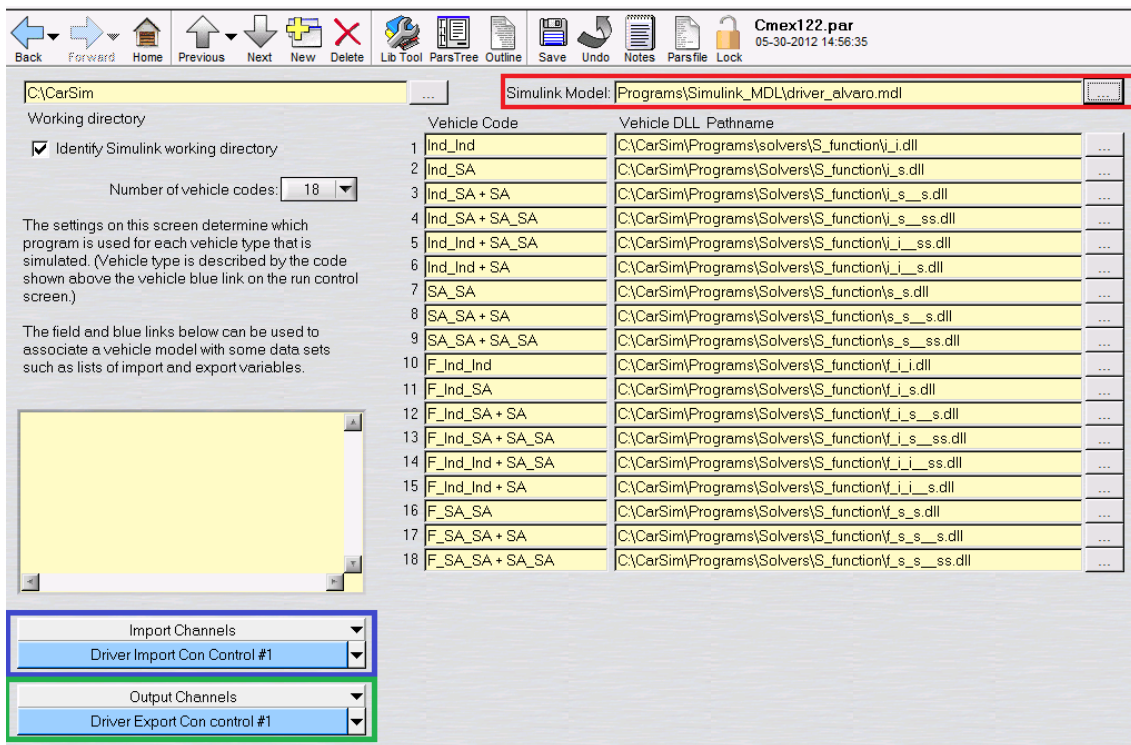


Figura 6.6: Pantalla desde la cual se definen los datos del modelo matemático



En este caso el archivo del modelo matemático se denomina “driver\_alvaro.mdl” por lo tanto en el lugar marcado en rojo en la Figura 6.6 se ha de escribir “Programs\Simulink\_MDL\driver\_alvaro.mdl”. Desde esta ventana también se accede a la elección de las variables que recibe y aporta el simulador. Para definir las variables de entrada se ha de pulsar en el icono marcado en azul, ver Figura 6.7.

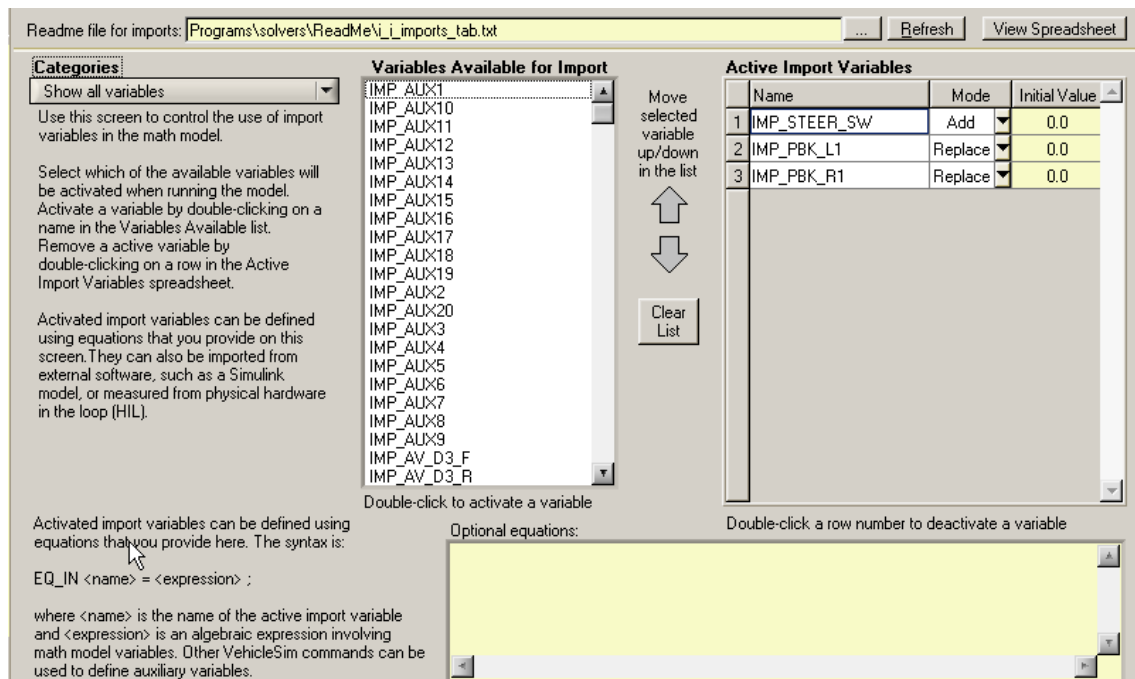


Figura 6.7: Ventana de elección de variables de entrada al simulador

El orden de las variables en esta ventana es importante ya que el sistema reconocerá los valores que recibirá en ese orden. En este proyecto las variables que se proporcionan al simulador son el momento de guiñada que debería de seguir el coche, la fuerza de frenado de la rueda delantera izquierda y derecha. Estos valores provienen del controlador con lógica *fuzzy* y distribuidor de fuerzas de frenado. Para definir las variables de salida se deberá de pulsar en el icono marcado en verde de la figura 6.6, ver figura 6.8.

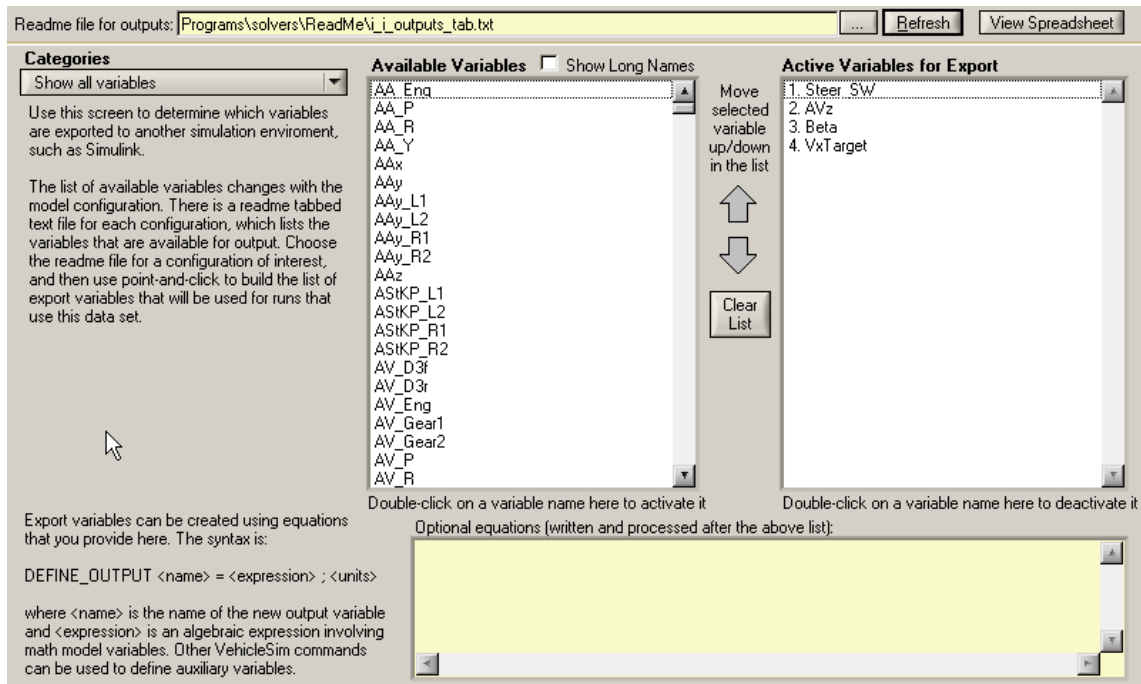


Figura 6.8: Ventana de elección de variables de salida del simulador

Como en la pantalla anterior el orden de las variables es muy importante. Los valores que se obtienen del simulador son el momento y velocidad de guiñada, el ángulo de deriva y velocidad lineal que lleva el vehículo. Con todos estos datos el control de estabilidad decidirá qué valores deberá de proporcionar al vehículo para mejorar su comportamiento. Una vez se ha hecho esto si se vuelve a la ventana de inicio del programa *CarSim* y se pulsa el icono azul denominado “Open Model” se verá el esquema completo, ver figura 6.9.

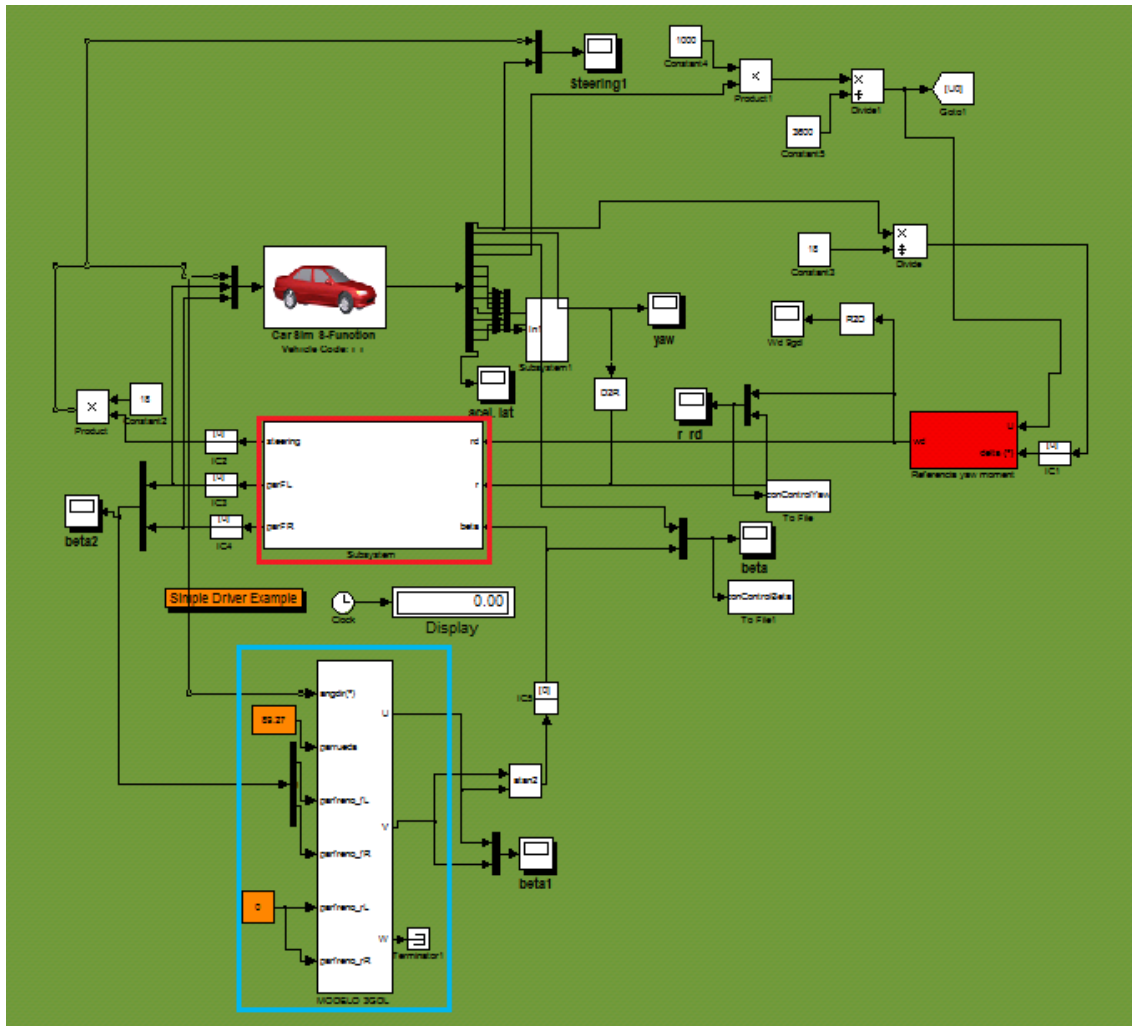


Figura 6.9: Esquema del modelo matemático introducido en el programa *CarSim*

Este sistema de control de estabilidad actúa sobre el coche a través del distribuidor de fuerzas de frenado de las ruedas delanteras y el momento de guiñada que favorecerá el buen comportamiento del vehículo. Los valores nuevos que recibirá el simulador se deciden en función de cómo se esté comportando el vehículo. En la siguiente figura 6.10 se podrá ver como son corregidos los datos recibidos. Para acceder a esta pantalla se ha de pinchar sobre el recuadro marcado en rojo de la figura 6.9.

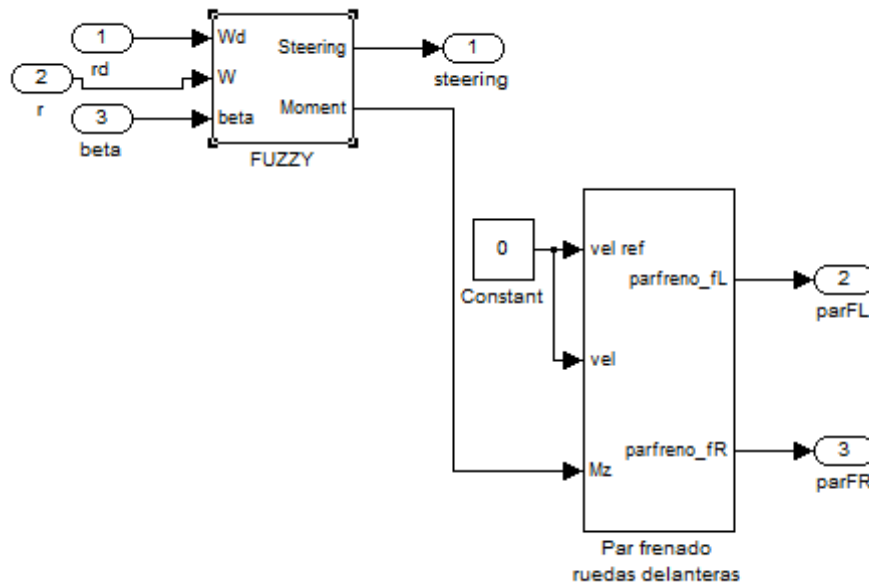


Figura 6.10: Lugar en el que se indican los nuevos valores que se envían al vehículo

Como se puede ver en esta figura 6.10 el controlador de lógica difusa recibe en primer lugar el valor de la velocidad de guiñada óptima calculada por el bloque de valor de referencia, en segundo lugar obtiene el valor de la velocidad de guiñada del propio vehículo que se lo aporta el programa *CarSim* que lo simula un sensor y por último se hace uso del valor del ángulo de deriva que se ha calculado en el modelo de 3GDL. La razón por la cual el ángulo de deriva se calcula a través del modelo de 3GDL es por la falta de un sensor que haga. Una manera de conocer este valor es utilizando un GPS pero el problema es que presenta es el tiempo que tarda en aportar el dato, la falta de precisión y el alto coste del utilizar un GPS. Si se pincha en el bloque denominado *FUZZY* se verá como utiliza estos datos, ver figura 6.11.

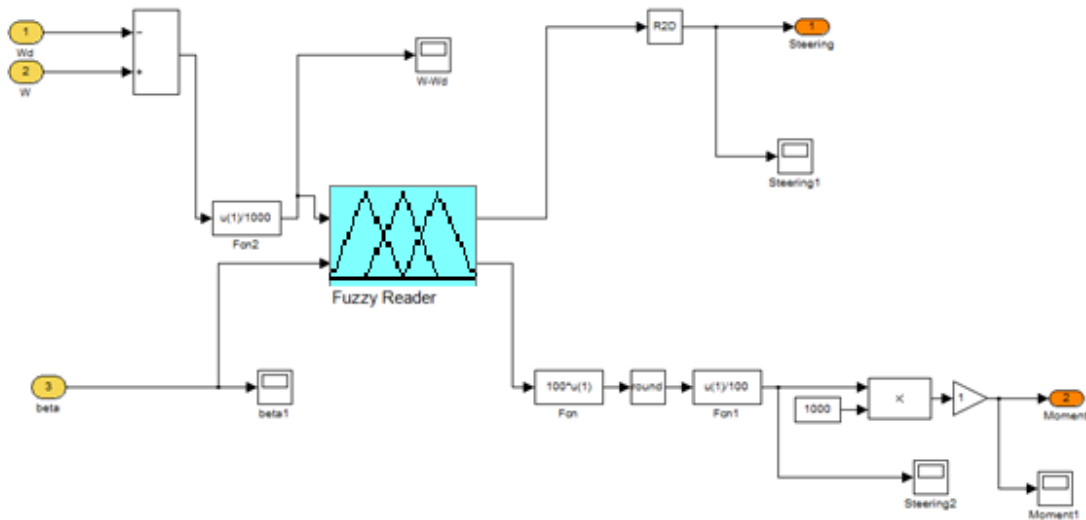


Figura 6.11: Cálculos realizados por el sistema de lógica difusa

El sistema de lógica difusa calcula dos valores, el ángulo de giro de la rueda que será uno de los valores que recibirá el simulador y el momento que lo recibe el distribuidor de fuerzas de frenado. Junto con las constantes de velocidad del vehículo calcula el reparto de las fuerzas de frenado óptimas para cada caso.

El valor del ángulo de deriva que se utiliza en el bloque de *Fuzzy* proviene del modelo de 3GDL. Si se pincha en el bloque marcado en azul en la figura 6.9 se podrá ver cómo y que se necesita para calcular este valor, ver figura 6.12.

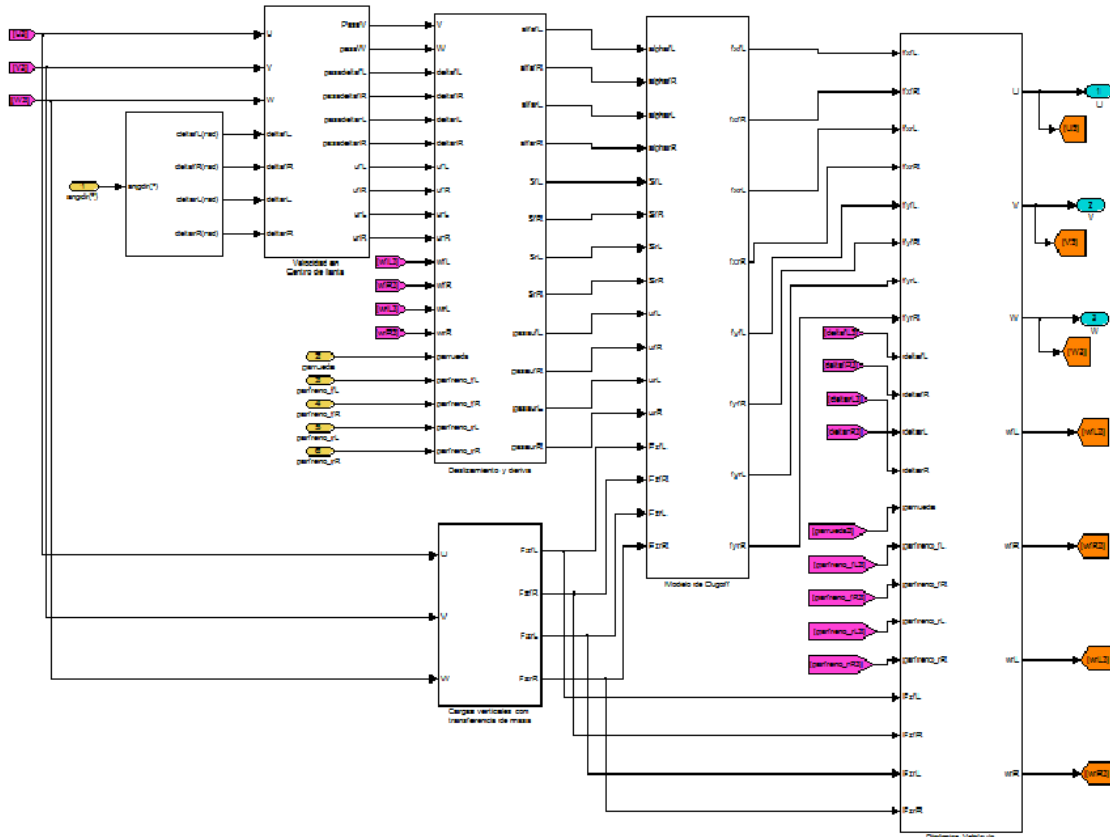


Figura 6.12: Modelo de 3GDL

Este bloque recibe los valores del par de frenado de las ruedas delanteras que provienen del distribuidor de fuerzas de frenado, el ángulo de giro del volante, el par de la rueda que es una constante y el ángulo de giro de la rueda del vehículo que viene el sistema de lógica difusa. Teniendo en cuenta la velocidad angular y velocidad lineal de cada rueda y el modelo de *Dugoff* como modelo de neumático se alcanza el valor del ángulo de deriva del vehículo.

Puesto que la finalidad del controlador de estabilidad es mejorar el comportamiento del vehículo a través del ángulo de dirección de las ruedas y el par de frenada de las ruedas delanteras estos son los valores que deberá de recibir el simulador. Gracias a la combinación de ambos programas de ordenador se puede comparar en comportamiento de un vehículo que lleva incorporado un control de estabilidad frente a otro sin ningún sistema de estabilidad en diferentes situaciones críticas.

En un principio el controlador del sistema lógica borrosa era una función desarrollada en *Simulink* y eso hacía que el programa *CarSim* tardara mucho tiempo en utilizar el controlador. Para hacer más eficiente el controlador se escribió en el lenguaje de programación "C". Por eso se utilizaba unos ficheros del *Matlab* donde los controladores *Fuzzy* ya estaban escritos en lenguaje "C" y se encuentran en "matlabroot/toolbox/fuzzy/fuzzy". Para ajustarlo al programa de control se tuvo que cambiar los ficheros, "fuzzyReader.c" y "fuzzyReader\_wrapper.c". Para compilar estos ficheros se ha utilizado el compilador "Lcc-win32 C 2.4.1" que los convierte en ficheros de tipo ".mexw32". Con el controlador en este formato el *Simulink* ya puede volver a utilizarlo como un bloque "S-function". Una vez se modificó el controlador el programa de simulación comenzó a realizar los cálculos a una mayor velocidad.

## 7. RESULTADOS

En este capítulo se comparan los resultados que se obtienen enfrentando el controlador de estabilidad inicial con el propuesto. El controlador inicial se ha calculado utilizando un sistema de 13 grados de libertad, en este caso se pondrá a prueba dicho sistema utilizando el programa *CarSim* que simula el comportamiento dinámico del vehículo en diferentes situaciones. Puesto que los grados de libertad del programa son de 15 GDL el comportamiento dinámico del vehículo con el control de estabilidad variará según la situación. Los controladores de estabilidad propuestos se han creado mediante el método de prueba y error utilizando el programa *CarSim*. Por último se debatirán los valores obtenidos por el programa.

### 7.1. CASOS DE ESTUDIO

En cada caso de estudio se explicará las condiciones en las que se realiza la prueba, se expondrán y se compararan los resultados obtenidos entre el vehículo con el control de estabilidad inicial y el vehículo con el controlador propuesto. Las pruebas con las que se dictará la eficacia del sistema de control serán en un doble cambio de línea, en curvas y por último un *j-turn*. En cada caso cambiará la velocidad del vehículo y el coeficiente de rozamiento del asfalto imitando el efecto de una placa de hielo.



Para las pruebas de doble cambio de línea todos los vehículos deberán de evitar un tercer coche que realizará una frenada brusca y la distancia que separa a los vehículos del coche a esquivar al inicio de la prueba es de 20 m. Para la prueba en curva lo que define cada caso es el radio de la curva, es decir si es de 200 metros o bien de 500 metros, y el ángulo de la curva que puede ser de 90°. Por último se realizará la prueba de un círculo de radio 152 m y una velocidad de 120 m/s, ver tabla 7.1.

CASO	MANIOBRA	VELOCIDAD	ASFALTO
1	Doble cambio de línea	108 km/h	Seco
2	Doble cambio de línea	72 km/h	Hielo
3	Curva de radio 200 m	108 km/h	Seco
4	Curva de radio 500 m	108 km/h	Hielo
5	<i>J-turn</i> de radio 152 m	120 km/h	Seco

*Tabla 7.1: casos de estudio*

En todos los casos se expondrán los resultados más significativos que son, la gráfica de la trayectoria, la gráfica de la aceleración lateral, la gráfica de la velocidad de guiñada y por último la gráfica del ángulo de deriva. La gráfica de la velocidad de guiñada representa el error del valor obtenido de esa variable, es decir, se ha restado el valor calculado por el observador del programa que indica el valor ideal al resultado obtenido por los vehículos para esta variable. Por lo tanto lo ideal sería que el valor obtenido en esta gráfica fuese siempre cero. Para que se puedan apreciar mejor las diferencias que hay entre ambos controladores se mostraran gráficas del desplazamiento lateral en los casos de las curvas y J-turn. Para el caso del doble cambio de línea se colocaran gráficas de momentos clave que muestren las diferencias en la trayectoria.

### 7.1.1. DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 108 KM/H EN ASFALTO SECO

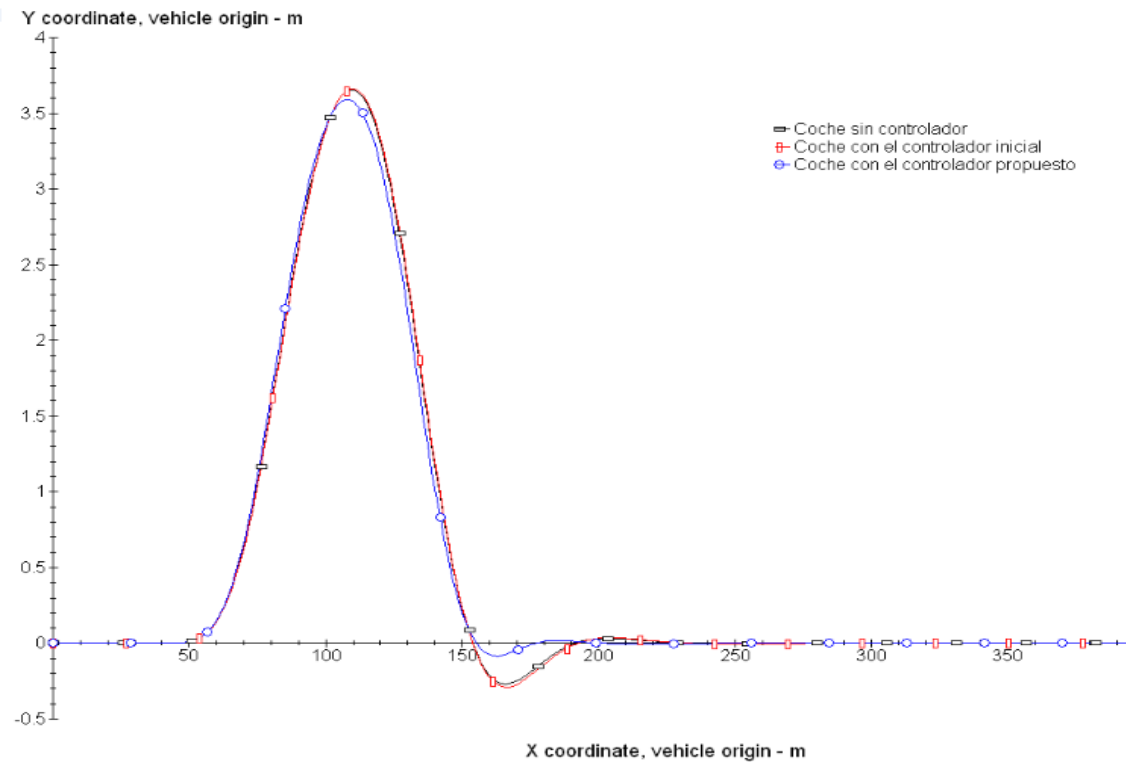
En este caso como el asfalto es seco el coeficiente de rozamiento que se utilizará será de 0.85. El primer resultado que se colocará será la imagen en la cual se podrá observar el comportamiento de ambos vehículos en distintos momentos de la prueba, ver imagen 7.1. Acto seguido se expondrán las gráficas de la trayectoria y aceleración lateral que sufren ambos vehículos, ver gráfica 7.1. Por último se comentaran la gráfica de la variable de velocidad de guiñada, “ $w$ ”, ver gráfica 7.2 y la gráfica de la variable de ángulo de deriva, “ $\beta$ ”, ver gráfica 7.3.



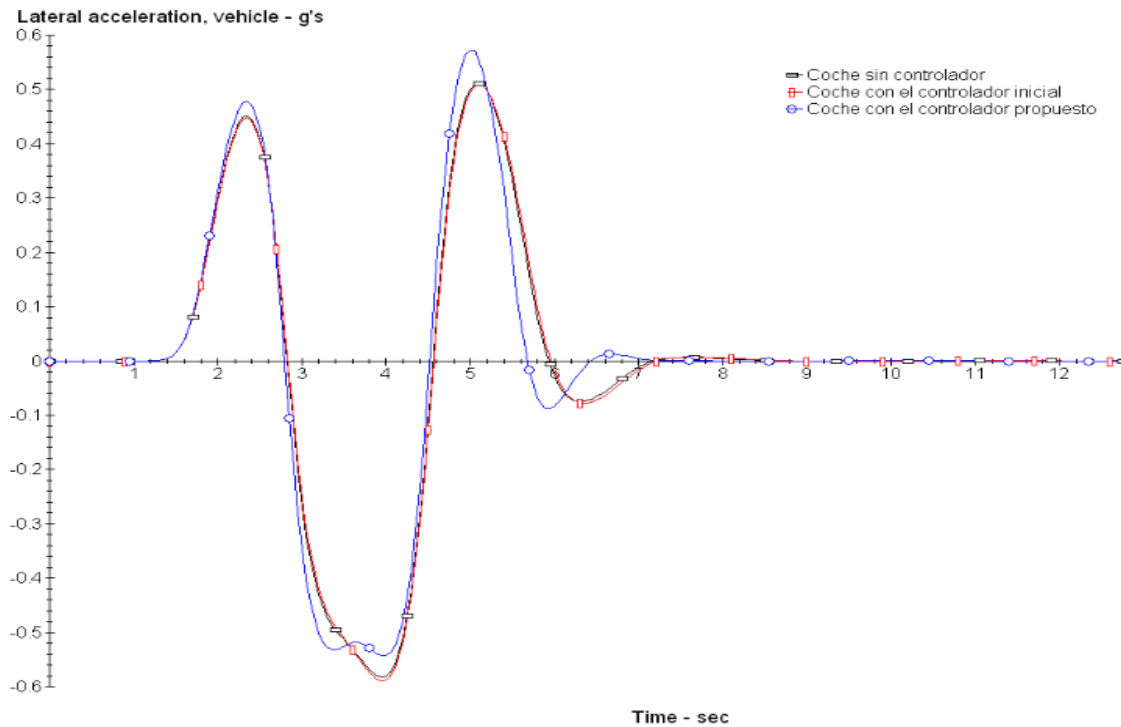
*Imagen 7.1: Representación visual del caso 1*

En la imagen, el vehículo de color rojo lleva incorporado el sistema de control estabilidad inicial mientras que el de color azul lleva instalado sistema propuesto. Aunque en la imagen no se aprecie hay un coche de color negro que no lleva ningún sistema incorporado. El coche de color amarillo solo realiza una frenada brusca y el

vehículo negro, que va en sentido opuesto, representa el segundo obstáculo que obliga a los vehículos a volver a su carril para evitar un accidente. En estas condiciones se aprecian pequeñas mejoras en el comportamiento del vehículo que lleva el controlador de estabilidad propuesto frente al inicial y el que no lleva ninguno.



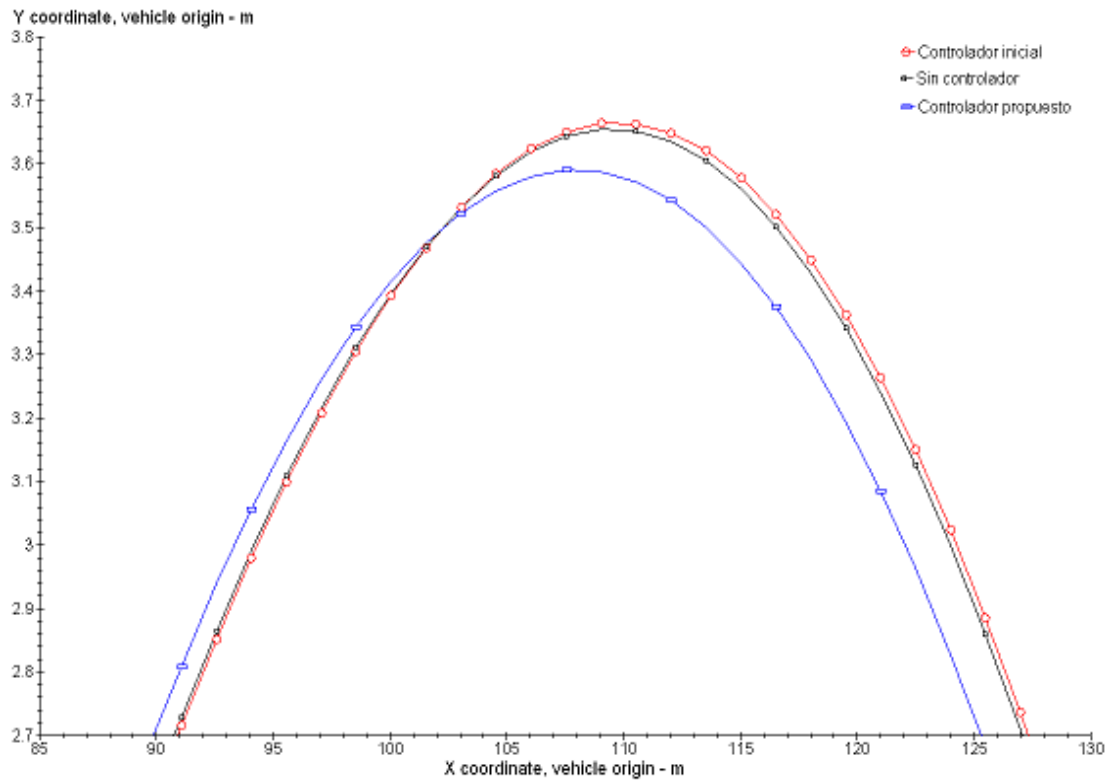
a)



b)

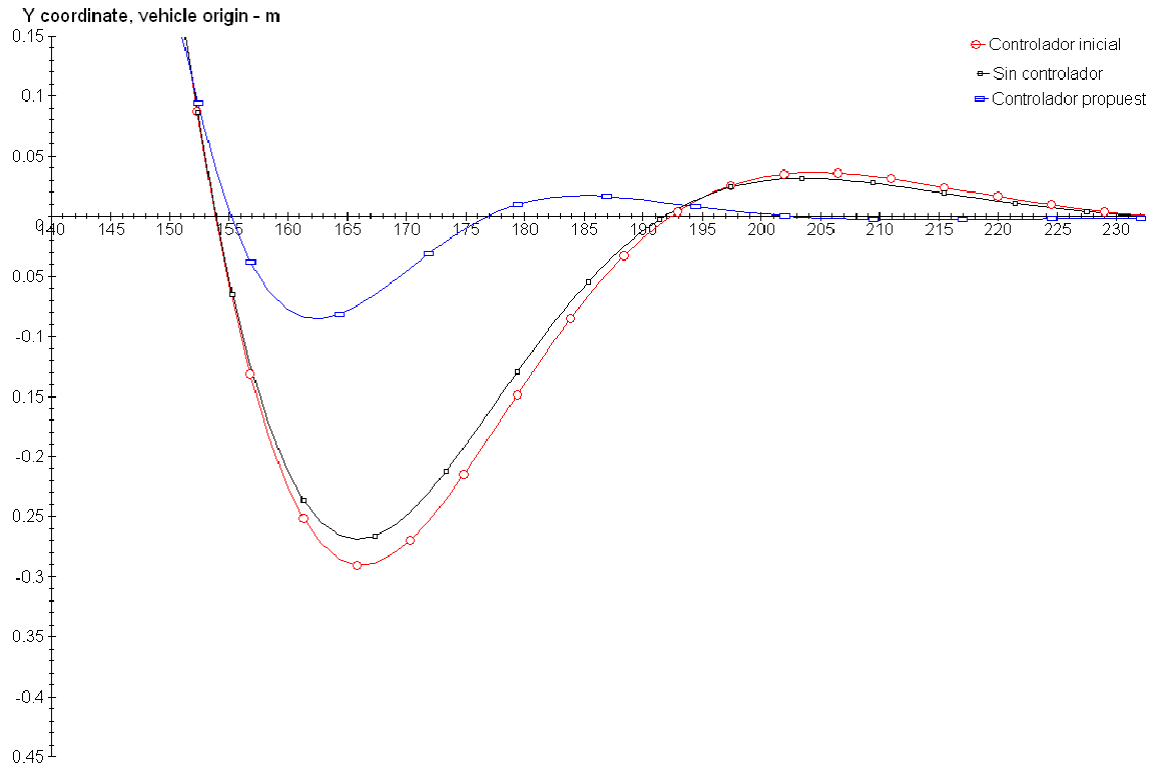
*Gráfica 7.1: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b)*

En la primera gráfica aparecen las trayectorias que siguen los vehículos y en la segunda se puede ver la aceleración lateral que sufren cada uno de los coches. En el caso de la gráfica de la trayectoria las líneas de los coches rojo y negro son casi idénticas pero en la línea que represente al vehículo con el controlador propuesto tiene diferencias a la hora de volver al carril y para recuperar la posición inicial ver gráficas 7.2 y 7.3. En la gráfica de la aceleración lateral ocurre lo mismo que en la anterior solo que al revés, el coche azul sufre más aceleración lateral. Esto se debe a que sus giros son más bruscos pero a la vez más firmes.



*Gráfica 7.2: Trayectoria seguida por los vehículos para volver al carril*

Esta gráfica muestra la vuelta al carril de los vehículos y se puede ver que el coche con el controlador propuesto lo hace desplazándose menos hacia la izquierda y comienza la maniobra en menos tiempo. Esta diferencia aumentaría según aumente la velocidad a la que se realice la maniobra. Aunque no se muestre en la gráfica la trayectoria que deberían de seguir todos los vehículos en ese momento sería una línea recta de 30 m a la altura de 3,5 m. Esto quiere decir que el vehículo que se aproximaría más a ese valor es el que lleva instalado el controlador propuesto.



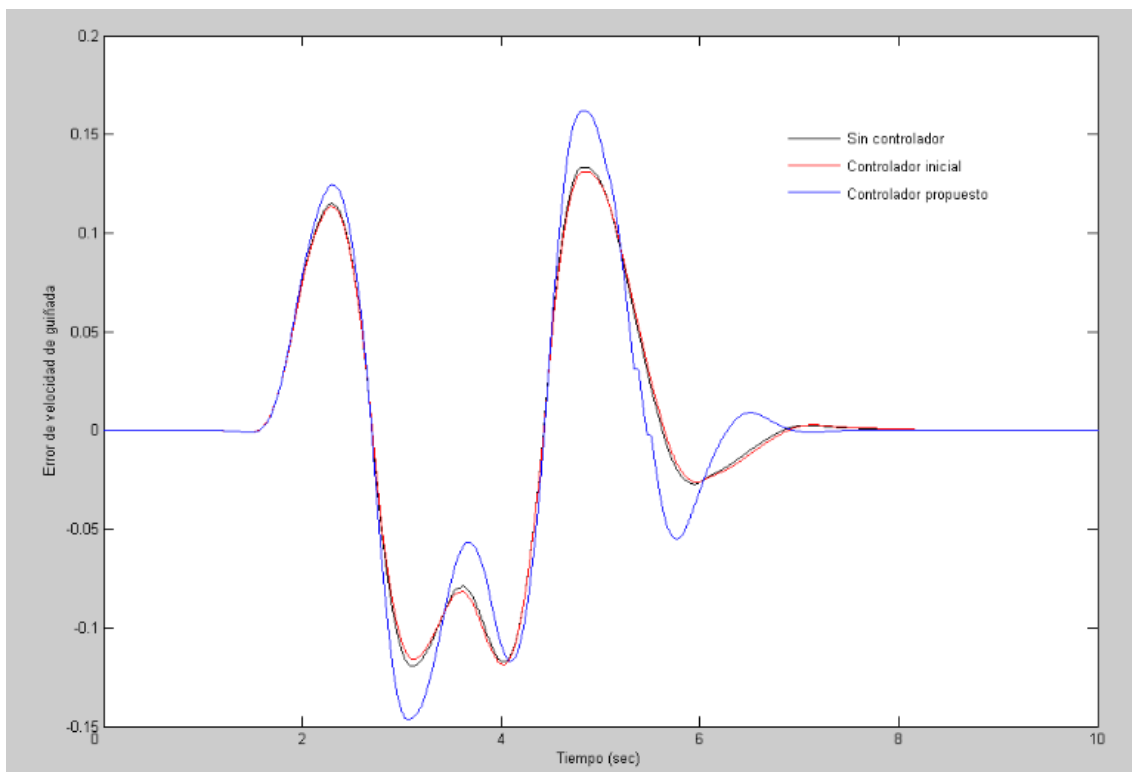
*Gráfica 7.3: Trayectoria seguida por los vehículos para volver a su posición inicial*

En esta gráfica se aprecia que el vehículo que más le cuesta volver a su posición inicial es el que lleva el controlador inicial. El que mejor recupera la posición es el coche que lleva incorporado el controlador propuesto con bastante diferencia. Se puede ver que el vehículo con el controlador propuesto recorre alrededor de 30 m menos que el resto de los coches para volver a su posición inicial. Esto indica que el coche está antes listo para poder realizar otra maniobra. Teniendo en cuenta el desplazamiento lateral, ver imagen 7.2, que sufren los vehículos, el que tiene más posibilidades de perder el control y salirse de la carretera es el controlador inicial. Probablemente si se aumentase la velocidad a la que se realiza la maniobra el vehículo con el controlador inicial se saldría al arcén mientras que el coche con el controlador propuesto se mantendría en su carril.



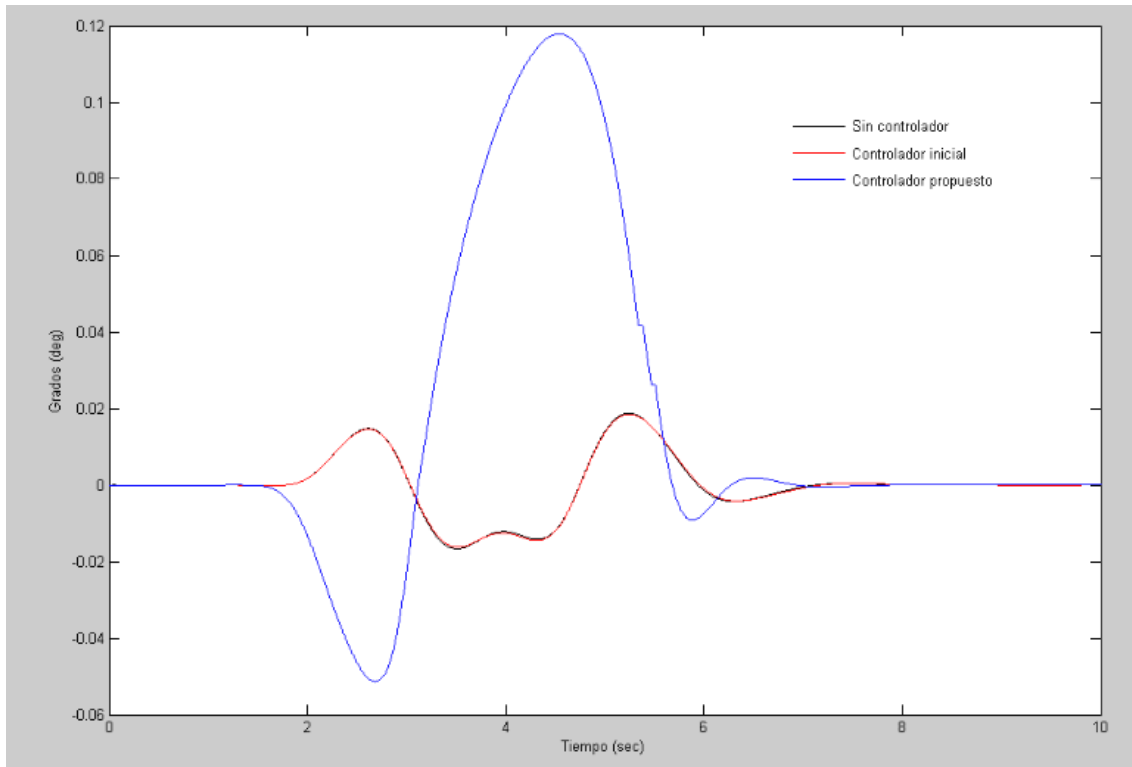
*Imagen 7.2: desplazamiento lateral a la hora de recuperar la posición inicial*

En esta imagen se muestra el momento de mayor diferencia que existe entre todos los vehículo a la hora de recuperar su posición inicial. Aunque no se pueda apreciar el vehículo sin controlador es más eficaz que el coche con el controlador inicial.



*Gráfica 7.4: Representación de la variable de velocidad de guiñada*

Como se puede ver ninguno de los vehículos se acerca en exceso al valor ideal pero el controlador propuesto se aleja más que los otros. Las líneas del coche sin control y el coche con el controlador inicial son prácticamente idénticas.



*Gráfica 7.5: Comportamiento del valor del ángulo de deriva*

Como se puede observar en esta gráfica los valores del vehículo sin controlador y el coche con el controlador inicial apenas hay diferencias. En el caso del vehículo con el controlador propuesto su resultado es peor, a pesar de que en la imagen se ve que lo hace mejor que los otros vehículos. Aunque la diferencia que existe entre ambos controladores es grande esto no afecta al conductor dado que no lo notaría. El ángulo en ambos casos es próximo a cero. El valor ideal del ángulo de deriva sería de cero.

Puesto que en esta maniobra ninguno de los vehículos pierde el control las diferencias que pueden aparecer entre los controladores no pueden ser muy notables. Pero a pesar de ello el controlador más eficaz en esta maniobra es el propuesto ya que supera al resto en los tres puntos clave, iniciar la maniobra, volver al carril y recuperar la



posición inicial. En el primer punto comienza antes a realizar la maniobra, le cuesta menos volver a su carril y recupera antes la posición inicial.

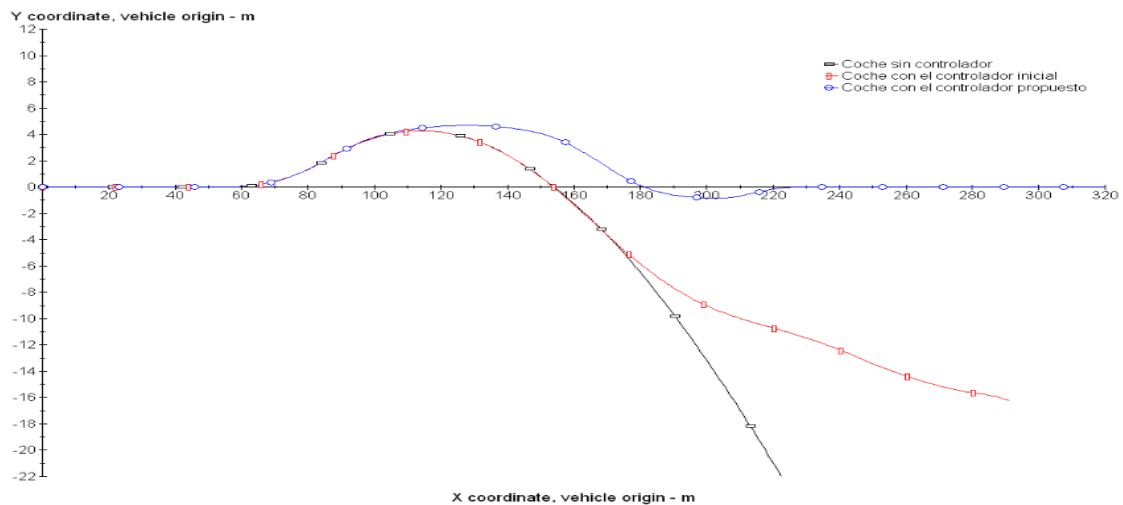
### **7.1.2. DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 72 KM/H EN ASFALTO CON HIELO**

En este caso como se quiere simular el efecto del hielo el coeficiente de rozamiento que se utilizará será de 0.2. El primer resultado que se colocará será la imagen en la cual se podrá observar el comportamiento de los vehículos en distintos momentos de la prueba, ver imagen 7.3. Después se expondrán las gráficas de la trayectoria y aceleración lateral que sufren ambos vehículos, ver gráfica 7.6. Para completar los resultados también se comentaran la gráfica de la variable de velocidad de guiñada, ver gráfica 7.7 y la gráfica de la variable de ángulo de deriva, ver gráfica 7.8.

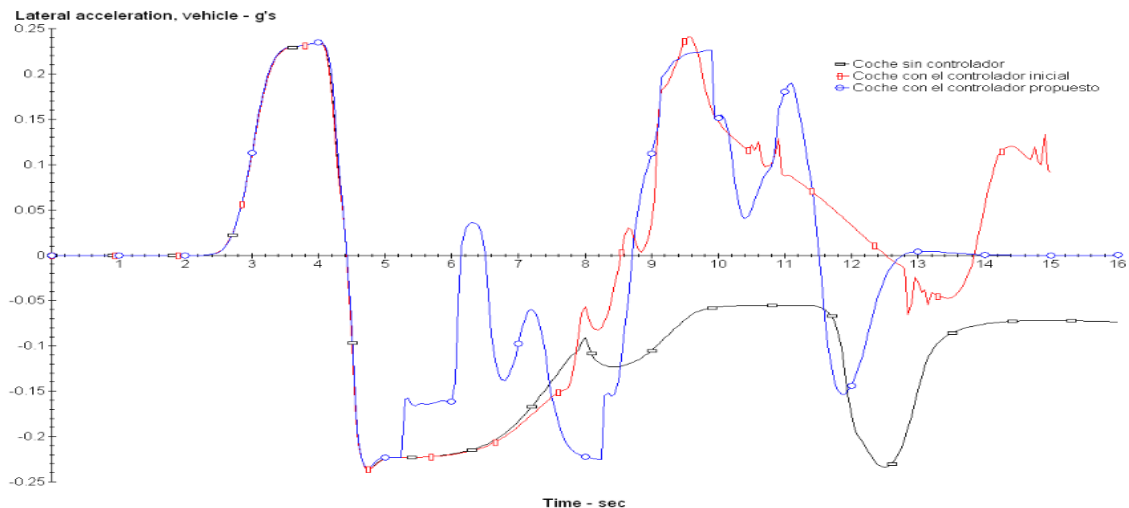


*Imagen 7.3: Representación visual del caso 2*

En la imagen, el vehículo de color rojo lleva incorporado el sistema de control estabilidad inicial mientras que el de color azul lleva instalado sistema propuesto y el coche de color negro no lleva ningún sistema incorporado. El coche de color amarillo solo realiza una frenada brusca y el vehículo en sentido opuesto representa el segundo obstáculo que obliga a los vehículos a volver a su carril para evitar un accidente. En estas condiciones el único vehículo que se mantiene en la carretera es el que lleva instalado el controlador propuesto. Tanto el coche sin controlador como el que tiene el controlador inicial pierden el control del vehículo y se salen de la carretera.



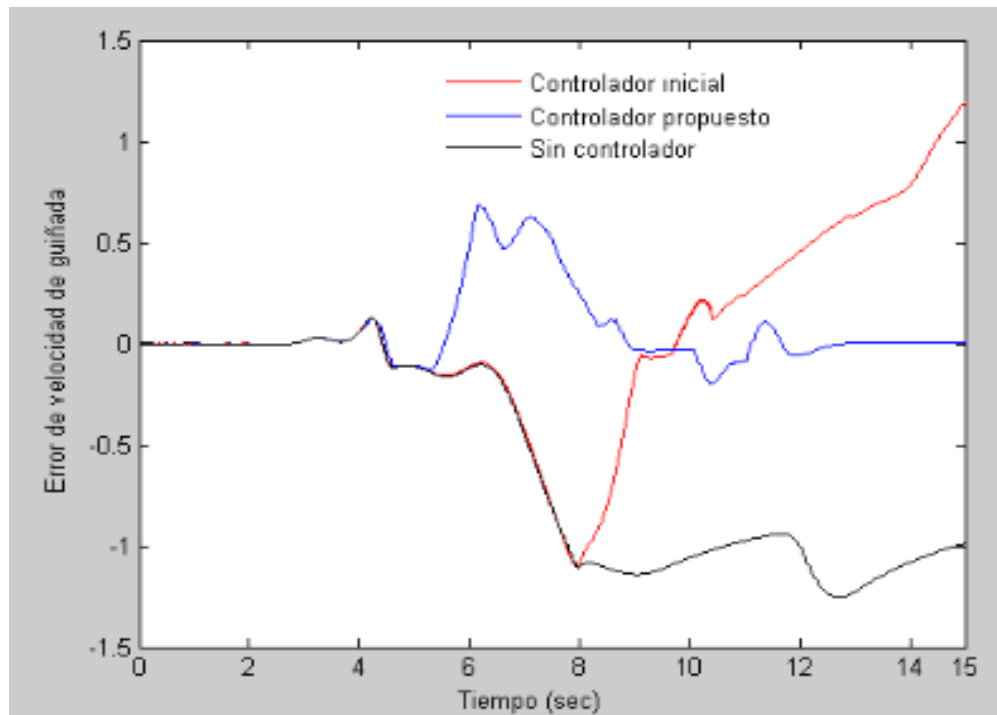
a)



b)

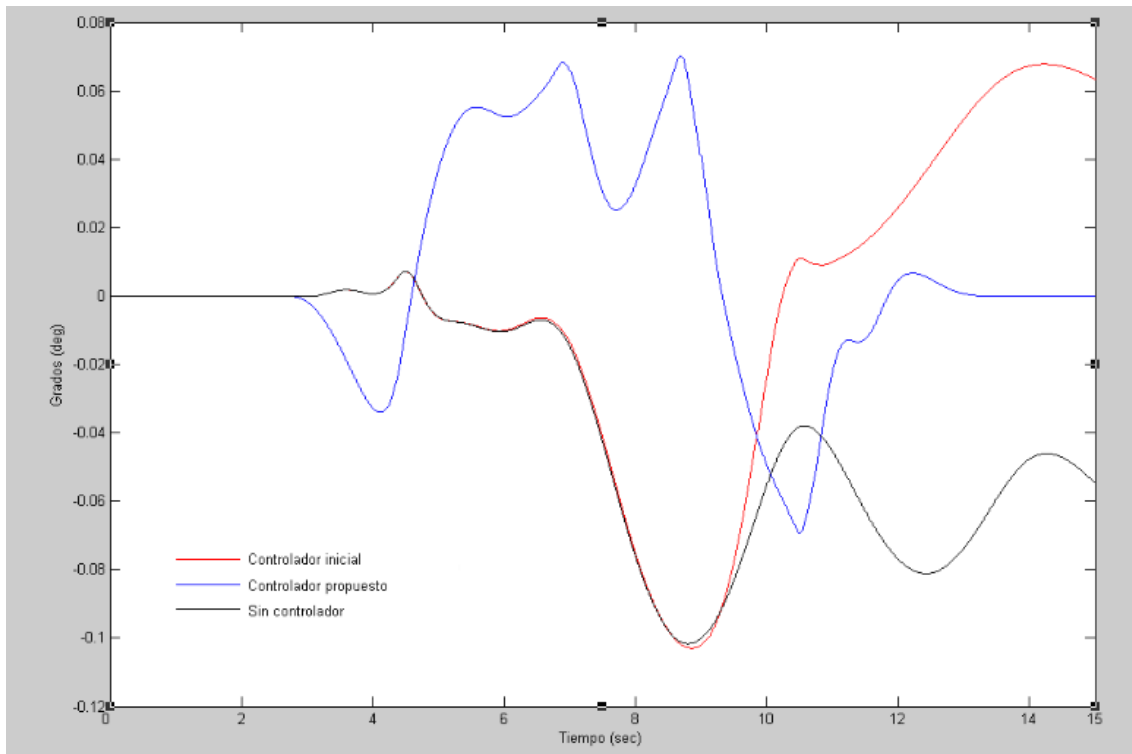
*Gráfica 7.6: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b)*

En la primera gráfica aparecen las trayectorias que siguen los vehículos y en la segunda se puede ver la aceleración lateral que sufren cada uno de los coches. En el caso de la gráfica de la trayectoria ninguno de los vehículos sigue la trayectoria indica. Las líneas, negra y roja, pierden el control de vehículo de manera absoluta cuando intentan volver a su carril. El vehículo con el controlador inicial se aleja menos de la carretera que el coche sin controlador alguno. La línea azul que representa al vehículo con el controlador propuesto es el único que se mantiene en la carretera. La gráfica de la aceleración lateral se observa que ninguna línea es parecida a otra dado que cada vehículo sigue una trayectoria diferente. El coche que menos tiempo sufre es el que lleva incorporado el controlador propuesto ya que recupera antes su posición inicial.



*Gráfica 7.7: Representación de la variable de velocidad de guiñada*

Como se puede ver ninguno de los vehículos se acerca en exceso al valor ideal pero el que más se aproxima es el vehículo con el controlador propuesto. Además el coche con el controlador inicial se aleja cada vez más de este valor al igual que el coche sin controlador.



*Gráfica 7.8: Comportamiento del valor del ángulo de deriva*

Como se observa en la gráfica los mejores resultados son los obtenidos por el vehículo con el controlador propuesto. Al inicio de la maniobra los valores del coche con el controlador inicial y el coche sin controlador se asemejan pero una vez que deben de recuperar la posición cada coche obtiene valores diferentes. Estos valores no son lo suficientemente grandes como para que afecte al conductor.

En estas condiciones se muestra que el controlador propuesto es más eficaz que el inicial ya que en ningún momento se sale de la carretera ni pierde el control.

### 7.1.3. CURVA DE RADIO 200M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO SECO

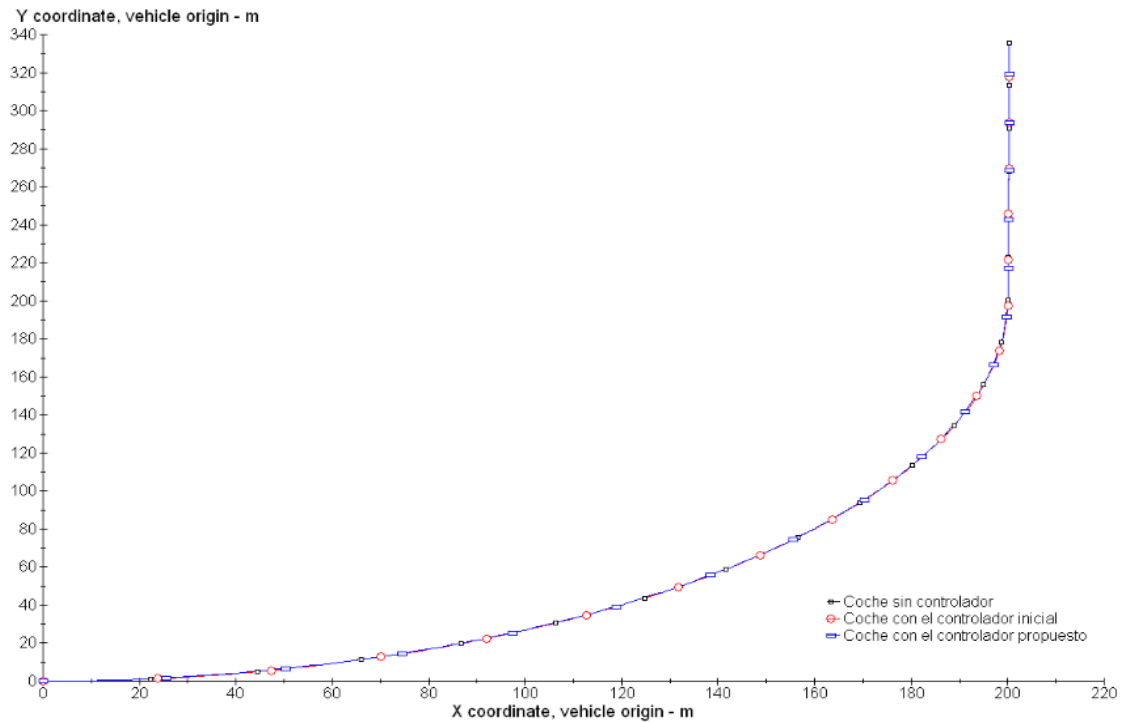
En este caso se quiere simular el asfalto seco el coeficiente de rozamiento que se utilizará será de 0.85. El primer resultado que se colocará será la imagen en la cual se podrá observar el comportamiento de ambos vehículos durante la prueba, ver imagen 7.4. Después se expondrán las gráficas de la trayectoria y aceleración lateral que sufren ambos vehículos, ver gráfica 7.9. Para completar los resultados también se comentaran la gráfica del desplazamiento lateral, ver gráfica 7.10, de la variable de velocidad de guiñada, ver gráfica 7.11 y la gráfica de la variable de ángulo de deriva, ver gráfica 7.12.



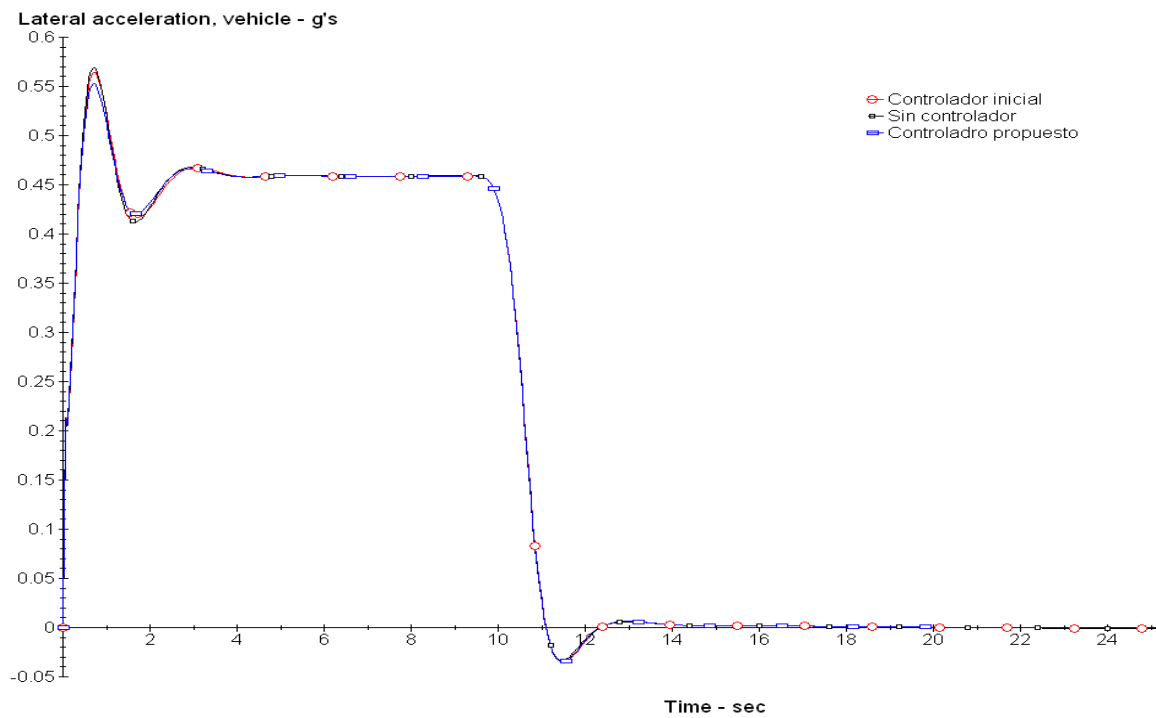
*Imagen 7.4: Representación visual del caso 3*

En la imagen, el vehículo de color rojo lleva incorporado el sistema de control estabilidad inicial mientras que el de color azul lleva instalado sistema propuesto.

Aunque en la imagen no se aprecie hay un coche de color negro que no lleva ningún sistema incorporado. Con estas condiciones ninguno de los vehículos pierde el control pero el coche que menos se aleja de la posición inicial es el que lleva instalado el controlador propuesto.



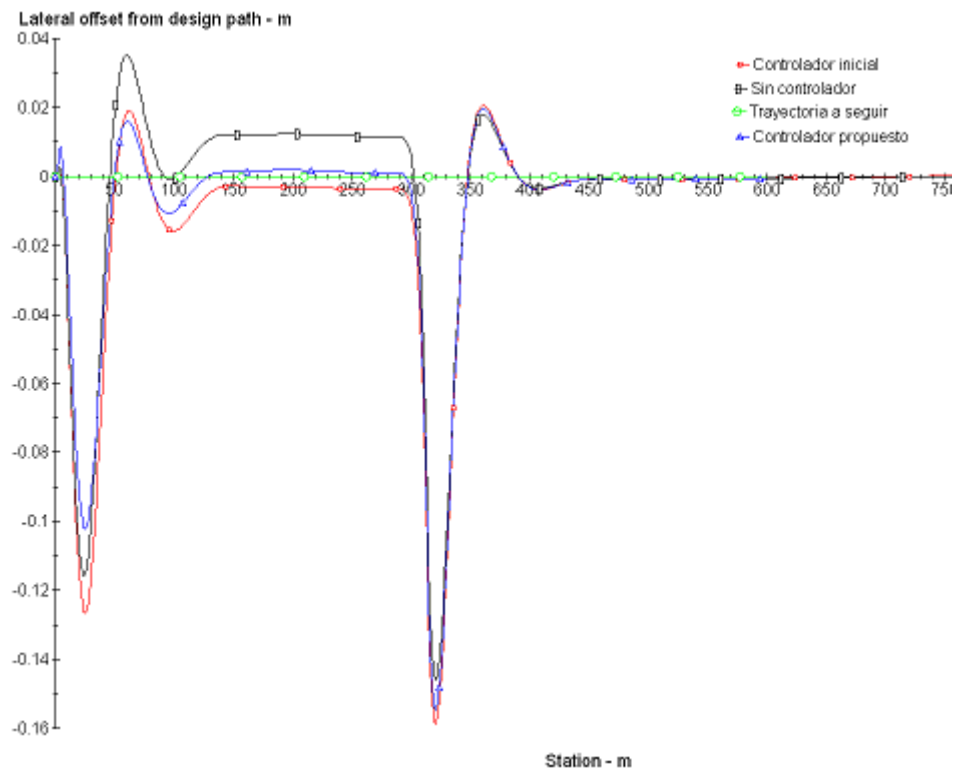
a)



b)

*Gráfica 7.9: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b)*

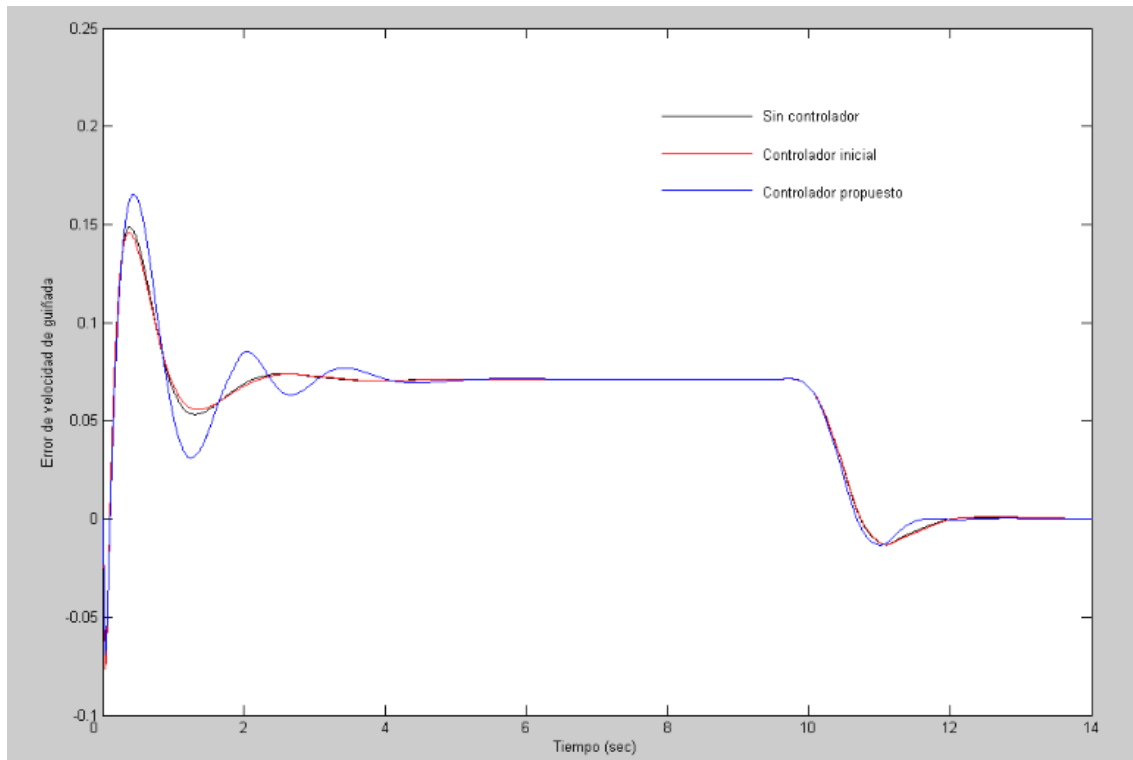
En la primera gráfica aparecen las trayectorias que siguen los vehículos y en la segunda se puede ver la aceleración lateral que sufren cada uno de los coches. En ambas gráficas las líneas son casi idénticas. En el caso de la gráfica de la aceleración lateral el vehículo con el controlador propuesto sufre algo menos en algunos puntos concretos. Esto se debe a que las trayectorias son casi idénticas.



*Gráfica 7.10: desplazamiento lateral que sufren los vehículos*

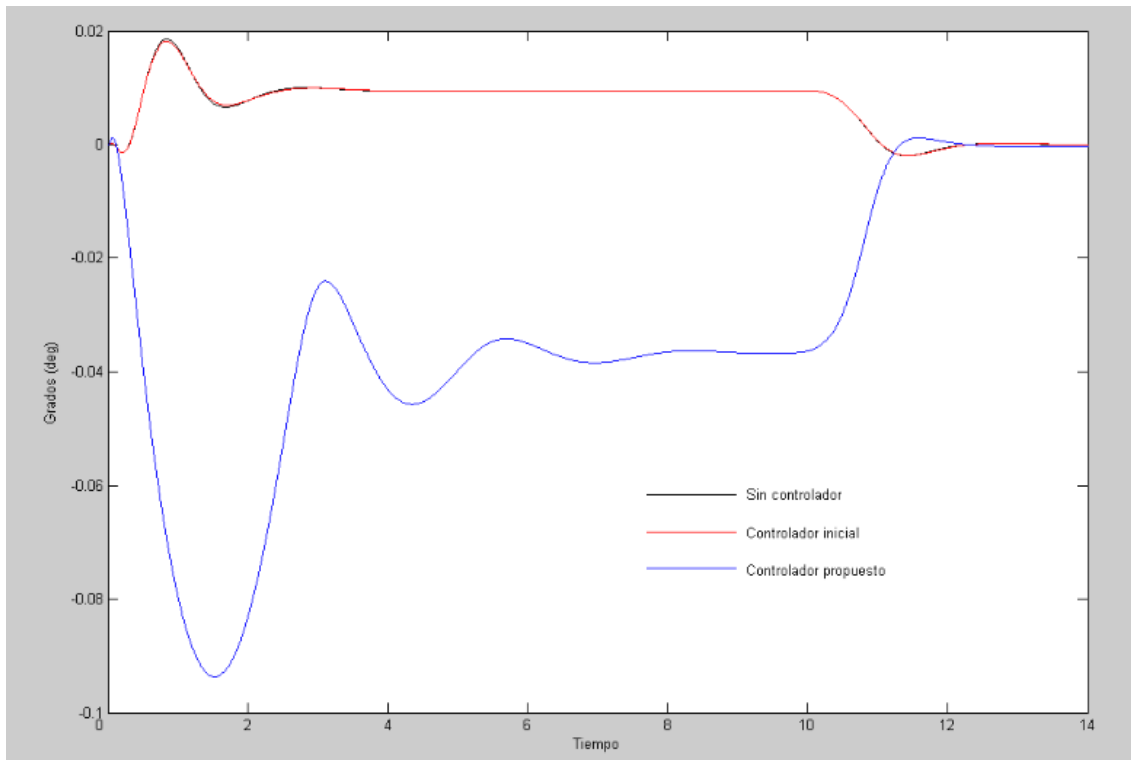
El valor ideal en esta gráfica es cero que supondría que en ningún momento de toda la maniobra se perdiese la posición inicial. El controlador más eficaz como se muestra en la gráfica es el propuesto. Las diferencias que hay entre ambos controladores son pequeñas ya que esta maniobra no es crítica.





*Gráfica 7.11: Representación de la variable de velocidad de guiñada*

Como se puede observar en esta gráfica los valores del vehículo sin controlador y el coche con el controlador inicial apenas hay diferencias. En el caso del vehículo con el controlador propuesto sus resultados son diferentes al inicio de la maniobra y un poco al final.



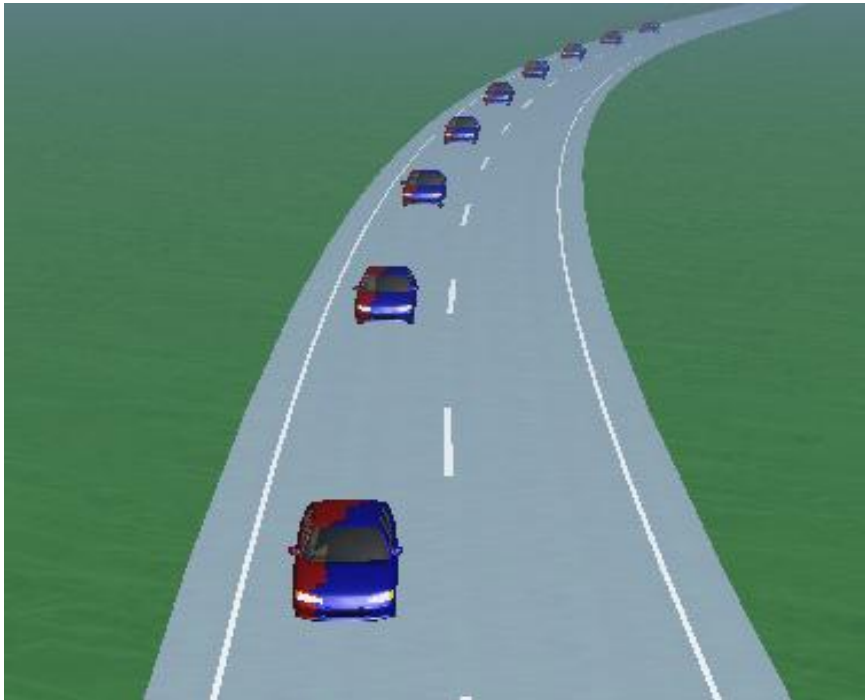
*Gráfica 7.12: Comportamiento del valor del ángulo de deriva*

Como se puede ver ninguno de los vehículos se acerca en exceso al valor ideal. Las líneas roja y negra son casi idénticas. Los resultados que obtiene el vehículo con el controlador propuesto son los que más se alejan del valor ideal. Aunque la diferencia que existe entre ambos controladores es grande esto no afecta al conductor dado que no lo notaría. El ángulo en ambos casos es próximo a cero. El valor ideal del ángulo de deriva sería de cero.

Para poder apreciar mejor las diferencias entre ambos controladores habría que aumentar la velocidad de la prueba. A pesar de que las diferencias son pequeñas el controlador propuesto es más eficaz que el inicial.

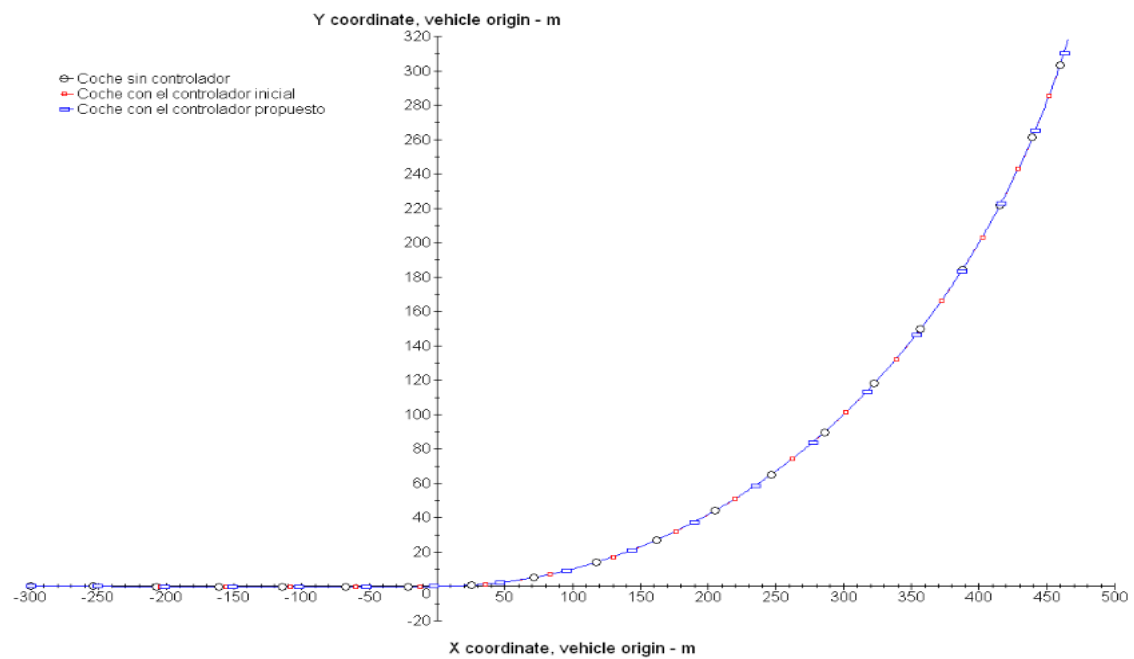
#### **7.1.4. CURVA DE RADIO 500M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO CON HIELO**

En este caso como se quiere simular el efecto del hielo el coeficiente de rozamiento que se utilizará será de 0.2. El primer resultado que se colocará será la imagen en la cual se podrá observar el comportamiento de todos los vehículos durante la prueba, ver imagen 7.5. Después se expondrán las gráficas de la trayectoria y aceleración lateral que sufren ambos vehículos, ver gráfica 7.13. Para completar los resultados también se comentaran la gráfica de la variable de velocidad de guiñada ver gráfica 7.14 y la gráfica de la variable de ángulo de deriva ver gráfica 7.15.

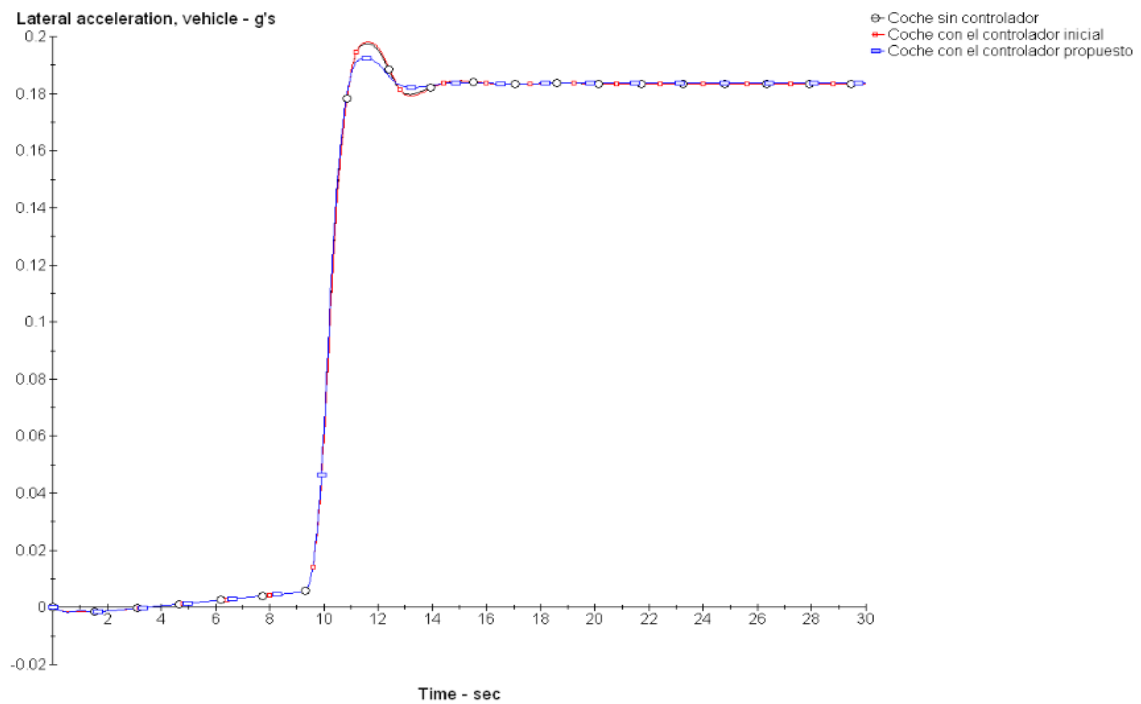


*Imagen 7.5: Representación visual del caso 4*

En la imagen, el vehículo de color rojo lleva incorporado el sistema de control estabilidad inicial mientras que el de color azul lleva instalado sistema propuesto. Aunque en la imagen no se aprecie hay un coche de color negro que no lleva ningún sistema incorporado. Con estas condiciones ninguno de los vehículos pierde el control y su comportamiento en este caso es muy parecido.



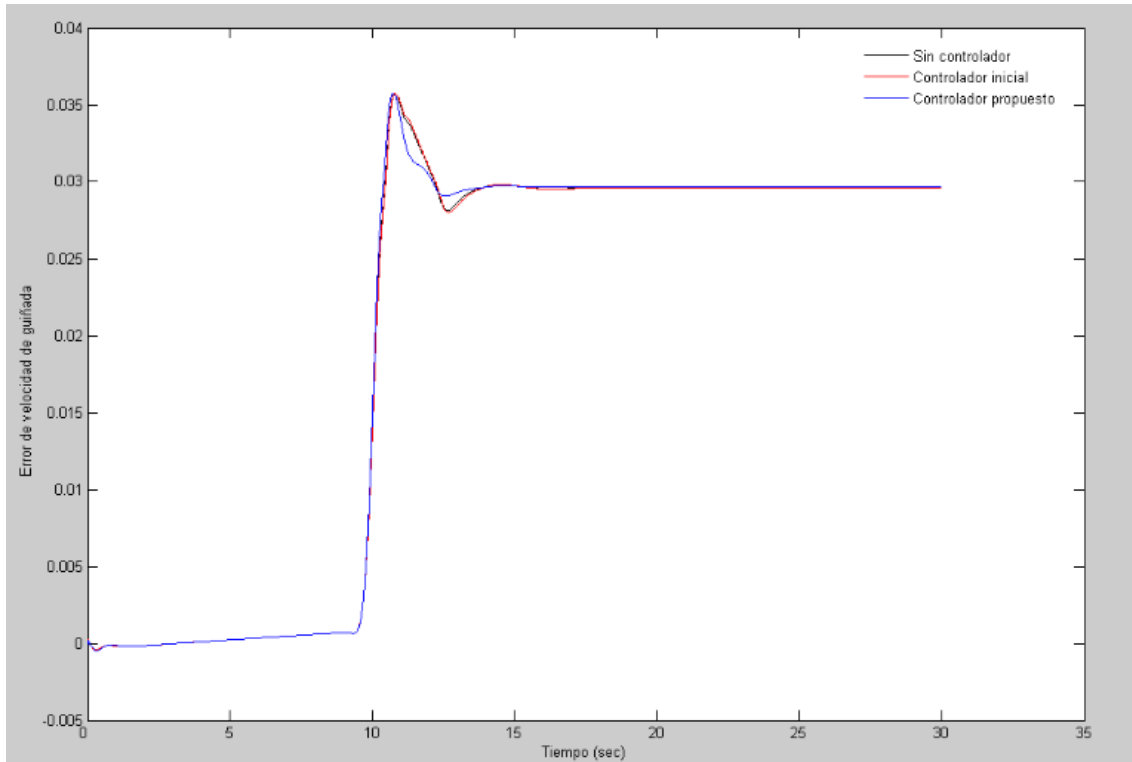
a)



b)

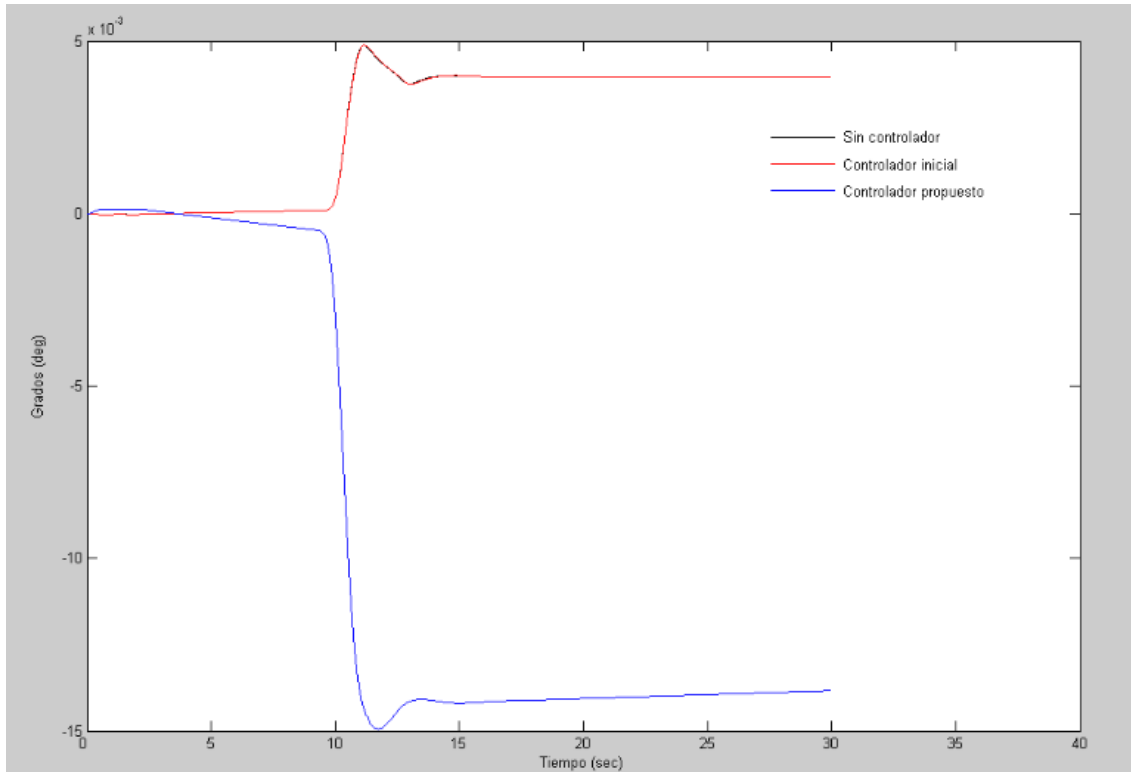
Gráfica 7.13: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b)

En la primera gráfica aparecen las trayectorias que siguen los vehículos y en la segunda se puede ver la aceleración lateral que sufren cada uno de los coches. En ambas gráficas las líneas son casi idénticas. En el caso de la gráfica de la aceleración lateral el vehículo con el controlador propuesto sufre algo menos en algunos puntos concretos. Estos puntos son al inicio de la curva.



*Gráfica 7.14: Representación de la variable de velocidad de guiñada*

Como se puede observar en esta gráfica los valores del vehículo sin controlador y el coche con el controlador inicial apenas hay diferencias. En el caso del vehículo con el controlador propuesto obtiene valores diferentes al inicio de la maniobra. Las diferencias al ser tan pequeñas no influyen casi en el vehículo.



*Gráfica 7.15: Comportamiento del valor del ángulo de deriva*

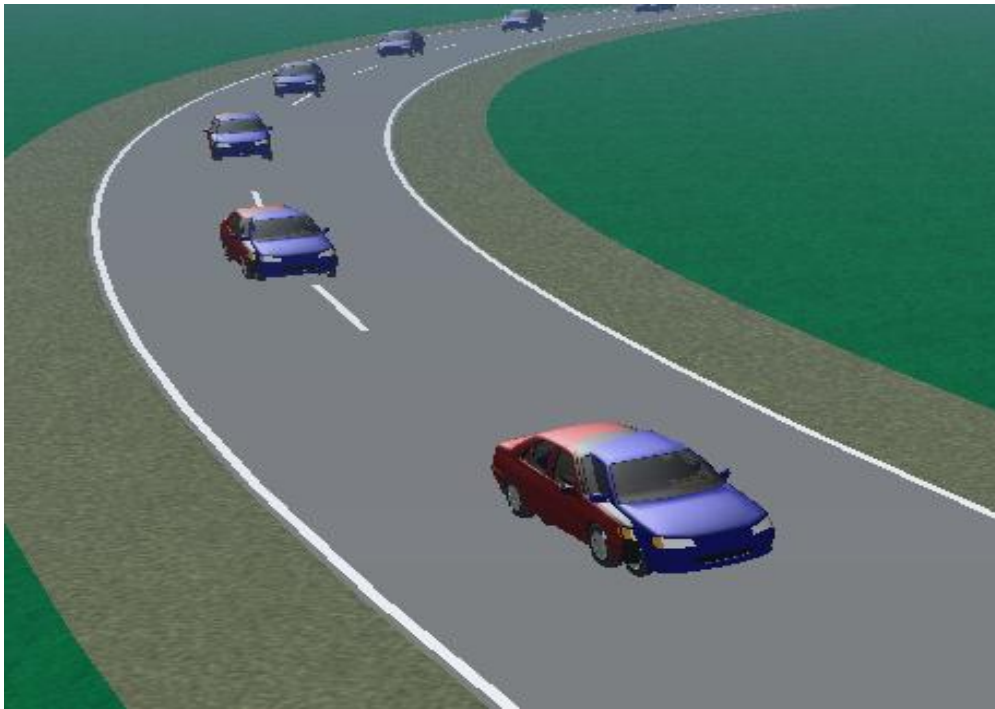
Como se puede ver ninguno de los vehículos se acerca en exceso al valor ideal y las líneas roja y negra son casi idénticas. El coche con el controlador propuesto obtiene peores resultados aunque no se nota dado que los valores son muy pequeños, no afectarían al conductor.

Dadas las condiciones de la prueba las diferencias no son muy notables.

### 7.1.5. CÍRCULO DE RADIO 152 M A 120 KM/H EN ASFALTO SECO

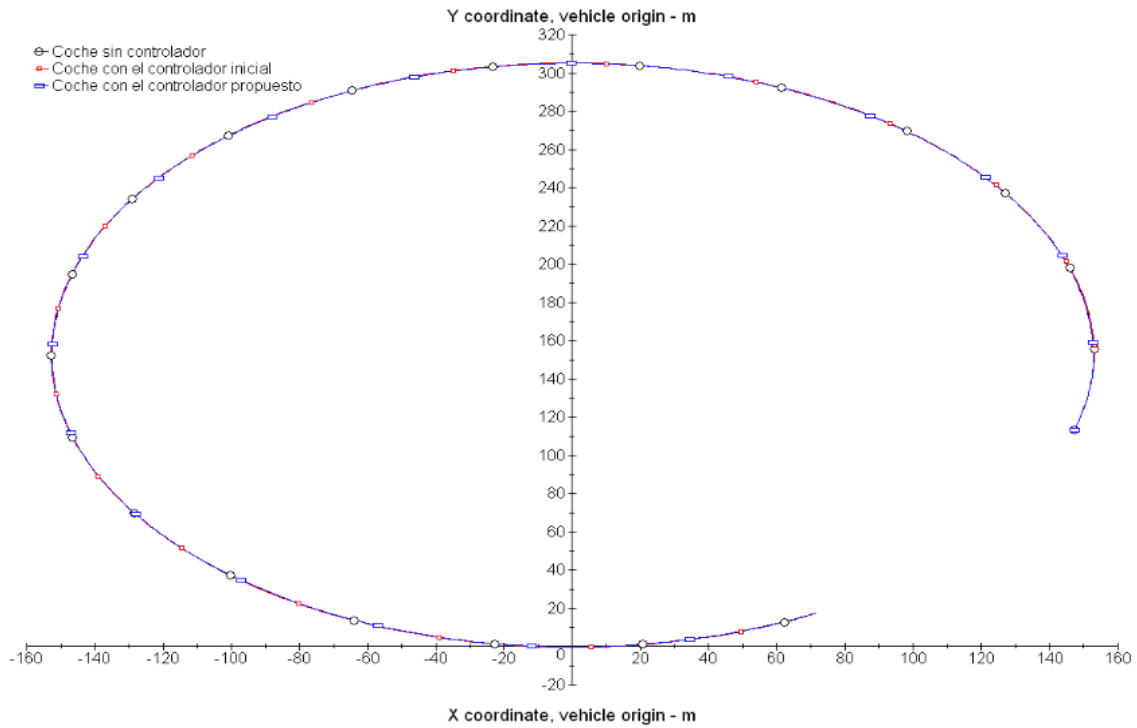
En este caso como el asfalto es seco el coeficiente de rozamiento que se utilizará será de 0.85. El primer resultado que se colocará será la imagen en la cual se podrá observar el comportamiento de ambos vehículos en distintos momentos de la prueba,

ver imagen 7.6. Acto seguido se expondrán las gráficas de la trayectoria y aceleración lateral que sufren ambos vehículos, ver gráfica 7.16. Por último se comentaran las gráficas, del desplazamiento lateral ver gráfica 7.17, de la variable de velocidad de guiñada, “ $w$ ”, ver gráfica 7.18 y de la variable de ángulo de deriva, “ $\beta$ ”, ver gráfica 7.19.

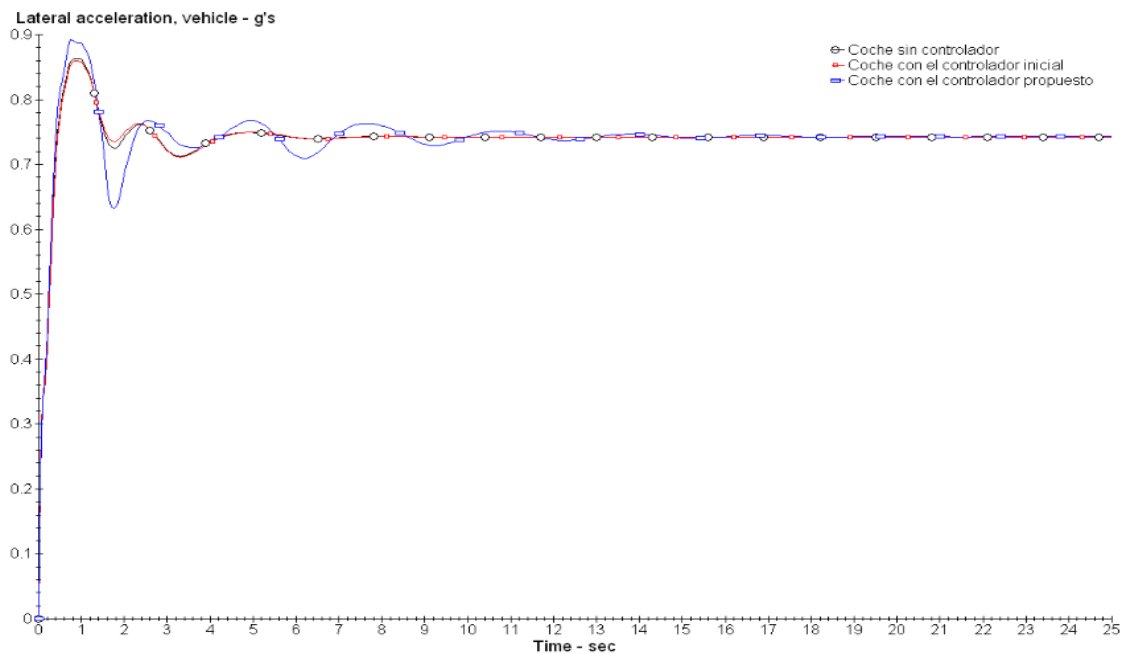


*Imagen 7.6: Representación visual del caso 5*

En la imagen, el vehículo de color rojo lleva incorporado el sistema de control estabilidad inicial mientras que el de color azul lleva instalado sistema propuesto. Aunque en la imagen no se aprecie hay un coche de color negro que no lleva ningún sistema incorporado. Con estas condiciones ningún vehículo se sale de la carretera pero el que más sufre y el que más se desvía es el coche con el controlador inicial mientras que el vehículo con el controlador propuesto mantiene su posición inicial.



a)

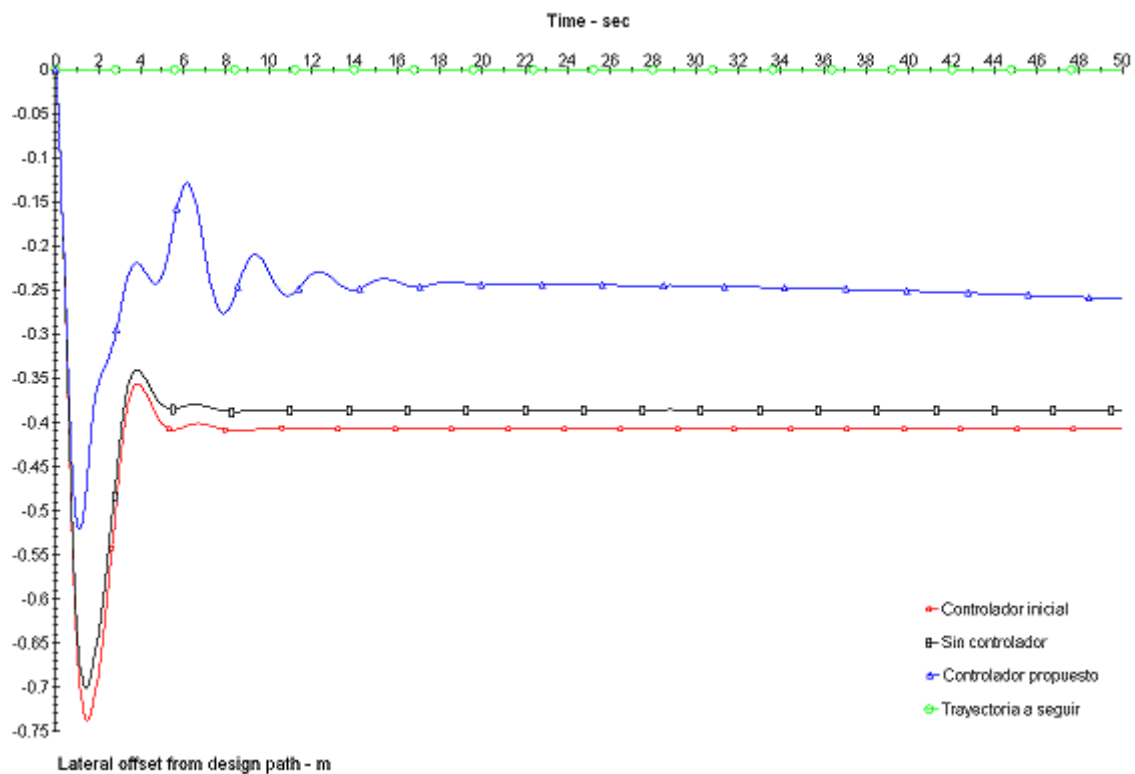


b)

Gráfica 7.16: Trayectoria seguida por los vehículos (a) y aceleración lateral que sufren los vehículos (b)



En la primera gráfica aparecen las trayectorias que siguen los vehículos y en la segunda se puede ver la aceleración lateral que sufren cada uno de los coches. En la gráfica de la aceleración lateral los coches negro y rojo sufren lo mismo mientras que el vehículo con el controlador propuesto hay momentos en los que sufre más, como al inicio de la maniobra. En la Gráfica de la trayectoria no se aprecia bien pero el vehículo con el controlador propuesto realiza mejor la maniobra que el resto de los coches. La diferencia no se aprecia dado que es una diferencia aproximadamente de 20 cm y la gráfica esta en metros.



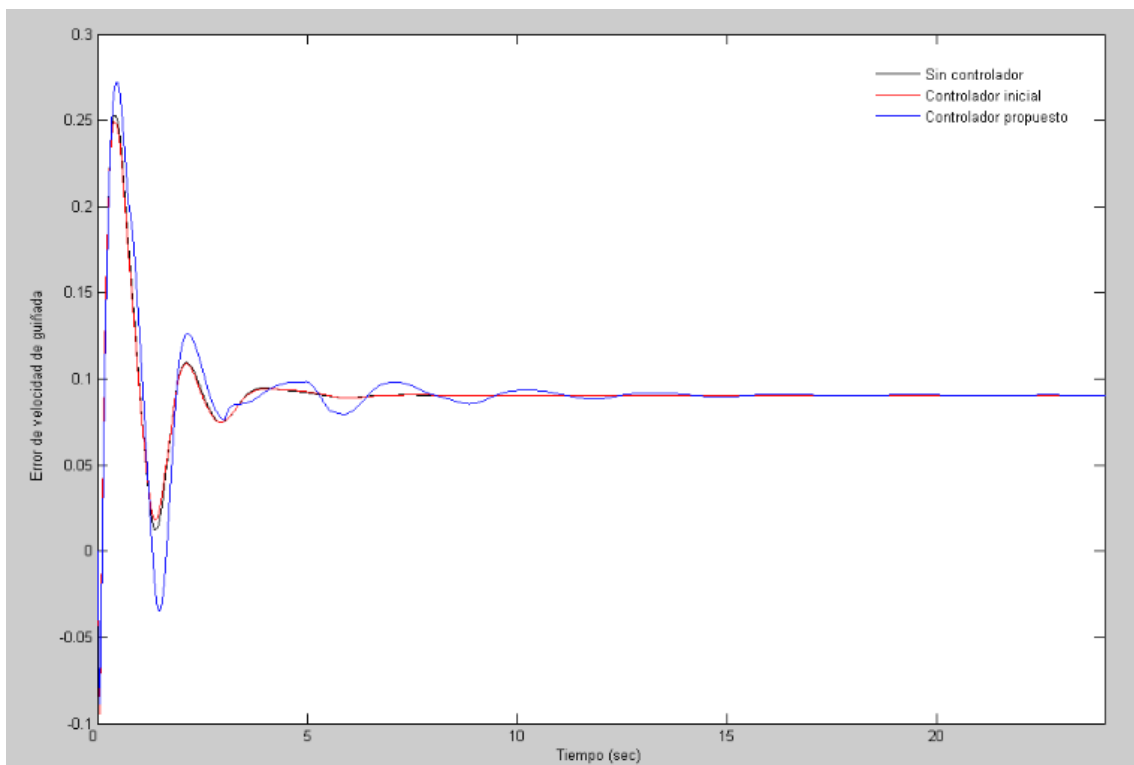
*Gráfica 7.17: desplazamiento lateral que sufren los vehículos*

Desde el inicio de la maniobra el controlador propuesto es más eficaz que el resto ya que se aleja menos de la posición inicial. Aunque la diferencia no es muy notable el vehículo sin controlador realiza mejor esta maniobra que el coche con el controlador inicial. El momento en el que hay una mayor diferencia es al inicio de la maniobra ver imagen 7.7. Y esta diferencia si es notable dado que ningún vehículo pierde el control.



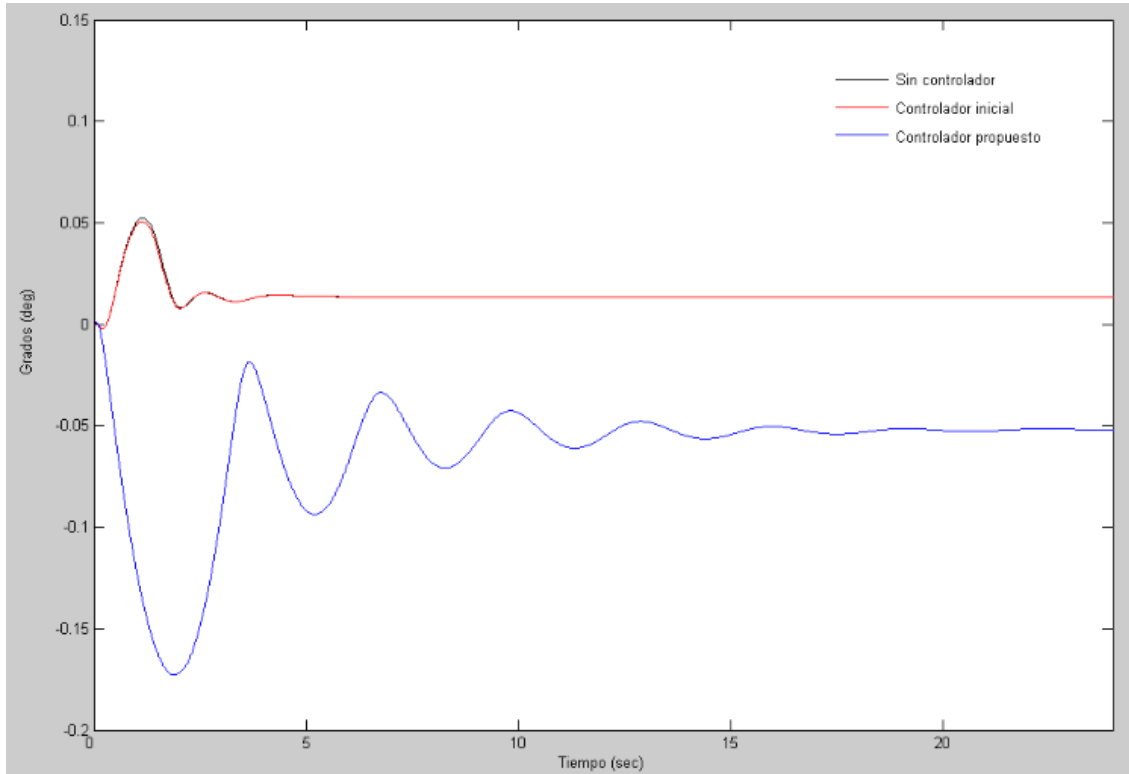
*Imagen 7.7: momento de mayor diferencia entre ambos controladores, 1.71 segundos*

En esta imagen se muestra el momento de mayor diferencia que existe entre todos los vehículo al inicio de la maniobra. Aunque no se pueda apreciar el vehículo sin controlador es más eficaz que el coche con el controlador inicial. Como se ve en la imagen el vehículo que más se desplaza a la derecha es el que lleva incorporado el controlador inicial.



*Gráfica 7.14: Representación de la variable de velocidad de guiñada*

Como se puede ver los vehículos, rojo y negro, obtienen casi los mismos resultados durante toda la maniobra. En el caso del vehículo con el controlador propuesto su resultado es diferente y algo peor al inicio de la prueba.



*Gráfica 7.15: Comportamiento del valor del ángulo de deriva*

Como se puede observar en esta gráfica los valores del vehículo sin controlador y el coche con el controlador inicial apenas hay diferencias. En el caso del vehículo con el controlador propuesto su resultado es peor a pesar que en la imagen se ve que es más eficaz. Estos valores no son lo suficientemente grandes como para que afecte al conductor. El valor ideal del ángulo de deriva sería de cero.

## 7.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS CONTROLADORES DE ESTABILIDAD

Entre los controladores de estabilidad que se han empleado en este proyecto existen ciertas diferencias aparte de los rangos de acción de las variables. Teniendo en cuenta el número de rangos de acción para las variables que emplean los controladores se puede ver que el propuesto es más simple. Esto conlleva a que el programa de simulación tarde tres veces más en calcular los resultados del caso con el controlador inicial que con el propuesto. Otra de las diferencias que presenta el controlador propuesto es que multiplica por tres el valor de la variable *steering* que va a recibir el vehículo. Lo más importante del controlador propuesto es que en función de si el asfalto, está seco o con hielo, sigue unas reglas diferentes. Con esto se logra que el controlador este mejor definido para cada situación.

- **DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 108 KM/H EN ASFALTO SECO**, el controlador propuesto realiza de manera más eficaz la maniobra.
- **DOBLE CAMBIO DE LÍNEA A 72 KM/H EN ASFALTO CON HIELO**, en esta prueba, el controlador propuesto tiene unas reglas diferentes que en el caso con asfalto seco. El controlador propuesto consigue que el vehículo en ningún momento se salga de la carretera. Por lo tanto es el más eficaz
- **CURVA DE RADIO 200M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO SECO**, en esta prueba, ninguno de los vehículos pierde el control pero el que mantiene la posición inicial es el coche con el controlador propuesto. El resto de los vehículos se desplazan alrededor de 15 cm a la derecha.

- **CURVA DE RADIO 500M Y ÁNGULO DE 90º A 108 KM/H EN ASFALTO CON HIELO**, con estas condiciones, ninguno de los vehículos pierde el control y su comportamiento en este caso es muy parecido. A pesar de ello el vehículo que menos se desplaza a la derecha es el que lleva el controlador propuesto.
- **CÍRCULO DE RADIO 152 M A 120 KM/H EN ASFALTO SECO**, ningún vehículo se sale de la carretera pero el que más sufre y el que más se desvía es el coche con el controlador inicial mientras que el vehículo con el controlador propuesto mantiene mejor la posición. Realiza de manera más eficaz la maniobra.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este capítulo se dedica a hablar sobre la eficacia alcanzada en el proyecto y posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar a raíz de este estudio y con los cuales se podría conseguir mejorar el control de estabilidad.

### 8.1. CONCLUSIONES

Los objetivos principales de este proyecto es poner a prueba la eficacia de un controlador de estabilidad, desarrollado mediante de la lógica difusa, creado con los programas *Simulink* y *Matlab* y de intentar crear uno más eficaz. Para ello se utilizará el programa de simulación *CarSim* y se deberá de combinar ambos programas para poder demostrar la eficacia del sistema y crear uno más eficaz.

- ✓ Se alcanzó con éxito el objetivo de combinar los programas *Simulink* y *CarSim* y se pudo poner a prueba el controlador de estabilidad en distintas situaciones críticas.
- ✓ Gracias al realismo del simulador *CarSim* y su alto grado de eficacia permite obtener unos resultados más realistas que en el trabajo anterior. Además

propone herramientas más avanzadas para visualizar y calificar los datos obtenidos en los ensayos.

- ✓ Se ha conseguido crear un controlador que es más eficaz que el controlador inicial.
- ✓ En el proyecto se han expuesto los 5 casos, ver tabla 8.1, en los que se puede apreciar el comportamiento de los sistemas de control de estabilidad.

CASO	MANIOBRA	VELOCIDAD	ASFALTO	CONTROLADOR MAS EFICAZ
1	Doble cambio de línea	108 km/h	Seco	Propuesto
2	Doble cambio de línea	72 km/h	Hielo	Propuesto
3	Curva de radio 200 m	108 km/h	Seco	Propuesto
4	Curva de radio 500 m	108 km/h	Hielo	Propuesto
5	<i>J-turn</i> de radio 152 m	120 km/h	Seco	Propuesto

*Tabla 8.1: pruebas realizadas*

Con los resultados obtenidos se concluye, que los vehículos con controladores de estabilidad pierden menos el control frente a los coches sin controladores y la utilización de las variables de momento de guiñada y la fuerza de frenado de las ruedas delanteras, es eficaz para controlar un vehículo. El método de utilizar la lógica borrosa para definir los valores de estas variables presenta resultados positivos.

## 8.2. TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de sistemas de control de estabilidad es un campo muy vivo en la actualidad. El método para crear y testar un controlador propuesto en este proyecto

es a priori eficaz y sencillo. Siguiendo esta línea de trabajo se puede conseguir mejorar el sistema de control de estabilidad realizando algunos cambios. Por ejemplo se pueden modificar los rangos que tiene registrados el sistema de lógica difusa. Con este cambio se modificarían los valores del momento de guiñada y de la dirección que se obtendrían para los mismos valores de velocidad de guiñada del vehículo y del ángulo de deriva. A base de prueba y error se podrá conseguir optimizar el sistema de control de estabilidad. Se está empezando a utilizar redes neuronales que utilizan la lógica borrosa para optimizar por si solos un controlador. Es decir, el propio ordenador ira variando los rangos de las entradas y salidas en función de los resultados obtenidos en la prueba.

Una idea nueva que se propone en este proyecto es que se utilicen los mismos rangos para los valores de las variables en *fuzzy* pero que se utilicen unas reglas u otras en función de las condiciones del asfalto. Es decir, si el asfalto está seco o hay placas de hielo. Con esto se conseguirían mejores resultados, tanto en seco como en hielo, puesto que el controlador estaría preparado específicamente para cada situación.

El siguiente paso sería poner a prueba el controlador de estabilidad en un simulador HIL, *Hardware in the loop*. Con este tipo de simulador se puede conocer las sensaciones del conductor lo que indicará si nota en algún momento el efecto del controlador. Por último sería instalarlo en un coche real y ver los resultados que se obtienen.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. **Fundación Institucional Tecnológico para la Seguridad del Automóvil.** *El Control.*

Madrid : FITSA, 2006.

2. **Mechanical Simulation Corporation.**

[http://carsim.com/downloads/pdf/CarSim\\_Math\\_Models.pdf](http://carsim.com/downloads/pdf/CarSim_Math_Models.pdf). [En línea] Agosto de 2011.

3. **Mechanical Simulation Corporation.**

<http://carsim.com/company/customers/carsim.php>. [En línea]

4. **Mechanical Simulation Corporation.** <http://carsim.com/products/carsim/index.php>.

[En línea] 2012.

5. *Integrated control of front-wheel steering and front braking forces on the basis of fuzzy logic.* **M J L Boada, B L Boada, A Muñoz y V Díaz.** Madrid : Department of Mechanical Engineering, 28 de Octubre de 2005.

6. *Control híbrido para la estabilidad de un vehículo utilizando lógica fuzzy.*

7. L. Zadeh "La lógica difusa." *Computer* 21.4 (1988): 83-93.

8. **Introducción a la lógica difusa.** Guillermo Morales-Luna. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN.

9. **Lógica borrosa.** Tamara Benito Matías, M<sup>a</sup> Isabel Durán Vicente. Universidad Carlos III de Madrid.

10. **ESP programa electrónico de estabilidad.**

<http://www.aficionadosalamecanica.net/sistema-esp.htm>